



L'introduzione alla Fisica Ambientale è scritta per studenti dei primi anni di università, scritto allo scopo di dare una linea di studio dei concetti chiave e cercando di stimolare approfondimenti. Si affrontano a livello elementare i concetti di base della fisica dell'atmosfera, meteorologia e climatologia, idrologia e fisica del suolo, privilegiando la descrizione dei processi che caratterizzano gli ambienti terrestri. Il testo inizia col descrivere gli aspetti strutturali dell'ambiente, diviso nei suoi elementi classici sole, aria, acqua e terra; nella seconda parte si affrontano gli aspetti dinamici e quindi i flussi all'interno e tra i vari comparti, assieme al fenomeno del trasporto; nella terza parte sono invece introdotti i concetti di base relativi alle principali trasformazioni fisiche e chimiche associate alle interazioni tra energia e materia; infine nella quarta parte si affrontano i processi associati agli organismi viventi, per concludere con una introduzione alla climatologia.

AlmaDL è la Biblioteca Digitale dell'Alma Mater Studiorum Università di Bologna. AlmaDL ospita al suo interno gli archivi Open Access che rendono pubblicamente disponibili i contributi derivanti dalle attività di ricerca, didattiche e culturali dell'Ateneo bolognese. AlmaDL attua così i principi del movimento internazionale a sostegno dell'accesso aperto alla letteratura scientifica, sottoscritti dall'Università di Bologna assieme a molte altre istituzioni accademiche, di ricerca e di cultura, italiane e straniere.

<http://almadl.unibo.it>

Introduzione alla Fisica Ambientale

G.Vitali



Proprietà letteraria riservata.
© Copyright 2017 degli autori
Tutti i diritti riservati

Introduzione alla Fisica Ambientale

A cura di:
Giuliano Vitali
ISBN 978-88-96572-46-7

Versione elettronica disponibile alla pagina

<http://amsacta.unibo.it/6015/>

DOI: 10.6092/unibo/amsacta/6015

Stampa a richiesta eseguita da:
Asterisco Srl Tipografia Digitale
Via Belle Arti 31 a/b - 40126 Bologna
Tel. 051 236866 - Fax 051 233603
e-mail: info@asterisco.srl

Introduzione alla
Fisica Ambientale

Giuliano Vitali

Indice

Prefazione	7
Capitolo 1. Sole, aria e acqua	9
1.1. Il Sole	9
1.1.1. La Radiazione Solare	9
1.1.2. Termini radiometrici	10
1.2. La radiazione termica	11
1.2.1. La legge di Stefan-Boltzmann	13
1.2.2. Legge di Kirchoff	14
1.3. L'Irraggiamento Solare	15
1.4. La luce	16
1.4.1. Il Colore	17
1.4.2. Luci artificiali	17
1.4.3. La Luminosità delle lampade	19
1.4.4. Il condizionamento della luce	20
1.5. L'atmosfera terrestre	21
1.5.1. Cielo	21
1.5.2. Struttura dell'atmosfera	22
1.5.3. L'atmosfera terrestre come miscela gassosa	23
1.5.4. L'Atmosfera come filtro ottico	23
1.6. La natura particellare della radiazione	25
1.7. Fluidostatica	25
1.7.1. Unità di misura della pressione	26
1.7.2. La pressione atmosferica	27
1.7.3. Il galleggiamento	27
1.8. L'acqua	28
1.8.1. Il vapor d'acqua	28
1.8.2. Le masse d'aria	30
1.8.3. Nebbie e nubi	30
1.8.4. Misura della nuvolosità	31
1.9. Esercizi	31
Capitolo 2. Flussi di energia e materia	35
2.1. Dinamiche della radiazione solare	35
2.2. La radiazione al suolo	38
2.2.1. Bilancio energetico al suolo	39

2.2.2.	Il bilancio termico al suolo	40
2.2.3.	Termodinamica dei gas	42
2.2.4.	Il gradiente termico atmosferico	43
2.3.	Le dinamiche atmosferiche - la convezione	43
2.3.1.	Le brezze	45
2.4.	Le dinamiche atmosferiche - la rotazione terrestre	47
2.4.1.	La convezione a scala planetaria	48
2.4.2.	Il vento	49
2.4.3.	Turbolenza	50
2.5.	Esercizi	52
Capitolo 3.	Trasformazioni	55
3.1.	Evaporazione e condensazione	55
3.1.1.	Condensazioni in natura	56
3.2.	La Meteorologia	58
3.2.1.	Precipitazioni o idrometeore	61
3.3.	Idrologia superficiale	62
3.3.1.	Il Bilancio Idrico	65
3.3.2.	Ruscellamento e deflusso superficiale	65
3.3.3.	Erosione	66
3.3.4.	Il Trasporto di agenti inquinanti	67
3.4.	Esercizi	68
Capitolo 4.	Gli Organismi Viventi e l'Ambiente	71
4.1.	La Radiazione solare e le piante verdi	71
4.1.1.	La fotosintesi	71
4.1.2.	Efficienza di Assimilazione	72
4.1.3.	Misure dell'Accrescimento	72
4.1.4.	Il flusso dell'acqua dalle radici all'atmosfera	73
4.1.5.	Evapotraspirazione	74
4.1.6.	ET ed Irrigazione	74
4.1.7.	Il Bilancio Idrico	75
4.1.8.	Stima dell' ET_0	75
4.1.9.	Evapotraspirazione di una superficie in stress	77
4.2.	Fenologia	78
4.2.1.	La temperatura e la pianta	78
4.2.2.	Tipologie di piante	78
4.2.3.	Somme termiche	79
4.2.4.	La durata del giorno	79
4.2.5.	Il Coefficiente Colturale	80
4.3.	Stress ed agenti atmosferici avversi	81
4.4.	Clima	82
4.4.1.	I fattori del clima	82
4.4.2.	Le scale del clima	83
4.4.3.	Le dinamiche climatiche	84

4.4.4. Parametri ed Indicatori climatici	84
4.4.5. Classificazioni e Carte	85
4.4.6. Climi parametrici	85
4.4.7. Climatologia meteo	86
4.4.8. Classificazioni Climatiche di uso generico	86
4.4.9. Köppen-Pinna	88
4.4.10. Indici ombrotermici	88
4.4.11. Indici Agro-Climatici	90
4.4.12. Classificazioni fito-climatiche	92
4.5. Esercizi	93
Bibliografia	97

Prefazione

Queste dispense di Fisica Ambientale sono state scritte per studenti dei primi anni di università, con limitate conoscenze preliminari della materia ed inseriti in piani di studio orientati ad aspetti applicati non in grado di supplire ad una adeguata conoscenza dei concetti fondamentali. Si sono per questo cercate sinteticità ed autoconsistenza attraverso una linea di studio passante per i concetti chiave. Numerosi incisi che forniscono spunti ed approfondimenti utili alla comprensione dei concetti trattati fornendo radici storiche e riferimenti applicativi e web-link.

Queste dispense presentano introduzione a molti concetti che appartengono alla Fisica Applicata, e quindi presentati con un linguaggio proprio della Fisica che, sebbene in modo semplificato, poggia sul formalismo matematico. La Fisica è del resto fatta non solo di formalismo, ma anche di analisi di dati sperimentali, e quindi in alcune sezioni si richiameranno anche concetti di base della statistica, nonché della teoria della misura. Anche se in queste dispense si è evitato di addentrarsi nella descrizione dettagliata degli apparati di misura.

In termini di contenuti si affrontano concetti di base della fisica dell'atmosfera, meteorologia e climatologia e idrologia, orientandosi sui processi che caratterizzano gli ambienti terrestri.

Il testo è volutamente diviso in quattro parti. Nella prima si punta a descrivere gli aspetti statico strutturali dell'ambiente, diviso nei suoi elementi classici sole, aria, acqua e terra; nella seconda parte si affrontano gli aspetti dinamici e quindi i flussi all'interno e tra i vari comparti, assieme al fenomeno del trasporto; nella terza parte sono invece introdotti i concetti di base relativi alle principali trasformazioni fisiche e chimiche associate alle interazioni tra energia e materia; infine nella quarta parte si affrontano i processi che interessano gli organismi viventi, quali la climatologia.

CAPITOLO 1

Sole, aria e acqua

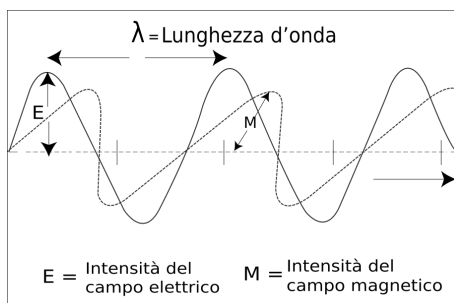
L'uomo filosofo insegue da sempre il perché delle cose attraverso dei modelli che gli semplifichino il modo di vedere quel mondo complesso che gli 'gira' attorno. Quella basata sui quattro elementi, fuoco, aria, acqua e terra, è una delle visioni più classiche, tramandataci dalla cosmogonia greca, con i suoi archetipi ormai radicati nell'uomo. È per questo che essa è stata scelta per tracciare il cammino concettuale individuato da questo testo. Nella schematizzazione qui utilizzata l'elemento fuoco lascia il posto ad un attore di prima grandezza, il sole, anche se il fuoco si accompagna ad importanti significati nella scienza moderna, la combustione ed in generale le trasformazioni della materia.

1.1. Il Sole

Il Sole è una stella, che gli astronomi classificano come 'nana gialla', fonte di gran parte dell'energia disponibile sulla terra, direttamente o indirettamente controllata dall'uomo, a partire dall'energia idroelettrica ed eolica ma è anche alla base delle riserve di carbone e petrolio in quanto anch'esse parte del ciclo di produzione primaria.

1.1.1. La Radiazione Solare. La radiazione solare è essenzialmente radiazione elettromagnetica (REM), una forma di energia data da una perturbazione del campo elettromagnetico, che si verifica all'interno di un mezzo (in passato chiamato etere) presente ovunque.

La REM è prodotta da ogni oggetto che ci circonda e molti congegni artificiali ne generano anche in modo accidentale.



Propagazione Ondosa - In un mezzo ogni 'perturbazione' si propaga sotto forma di onde: si pensi alla superficie di in uno stagno in cui tiriamo un sasso o come la perturbazione del 'campo' di pressione nell'aria genera un 'suono'. La propagazione di tale perturbazione può essere osservata in due modi. Se immaginiamo di viaggiare con essa (alla stessa velocità) potremo misurare la distanza tra i 'picchi' o gli avvallamenti: chiameremo tale distanza lunghezza d'onda (λ, m). Se invece ci fermiamo in un punto e con un cronometro misuriamo il tempo che passa tra una cresta e l'altra misureremo il periodo, il cui inverso è la frequenza (ν , Hz). Lunghezza d'onda (λ) e frequenza (ν) sono sempre legate dalla seguente relazione:

$$c = \lambda \cdot \nu$$

dove c è la velocità di propagazione ed è caratteristica del mezzo.

Quando un emettitore produce radiazione ad una sola frequenza si dice che siamo in presenza di *radiazione monocromatica*¹.

Le emittenti radiofoniche 'generano' REM ad un'unica frequenza quasi-monocromatica, la quale è poi modulata (es. in Ampiezza nella AM, in Frequenza nella FM) allo scopo di trasportare l'informazione voluta: voce, musica o dati. La REM è emessa e ricevuta attraverso **antenne**. In quelle più semplici (lineari) gli elettroni scorrono lungo un asse e la dimensione dell'antenna ci indica la lunghezza d'onda che stiamo emettendo o ricevendo.

Nello spazio vuoto la REM si propaga alla **velocità della luce** $c = 300,000 \text{ km/s}$, e anche in altri mezzi la parte trasmessa subisce solo piccoli rallentamenti.

Rifrazione - Un cambio di densità del mezzo (es. da aria ad acqua o vetro) determina una riduzione della velocità di propagazione nell'attraversamento della superficie di discontinuità, dando luogo ad un cambio di direzione. Nella rifrazione esiste un angolo critico di incidenza, al di sotto del quale il raggio viene riflesso dando luogo a fenomeni quali il **miraggio**.

Arcobaleno - Il fenomeno della rifrazione dipende anche dalla lunghezza d'onda (colore). **Prismi e reticoli** permettono di separare la luce nelle sue componenti. In natura il fenomeno si verifica ogni qualvolta un raggio solare incontra una massa d'aria ricca di fini goccioline d'acqua sospese (nuvole, nebbia) dando luogo ad archi multicolori noti come **arcobaleno**, tipicamente osservabile sul fronte di un temporale.

1.1.2. Termini radiometrici. L'energia associata alla REM emessa da una sorgente è solitamente riferita all'unità di tempo ed è quindi una

¹letteralmente monocromatico significa **di un solo colore** ma il termine è utilizzato anche quando si ha a che fare con REM al di fuori del visibile

potenza: viene in particolare indicato come **flusso radiante** la potenza emessa complessivamente nello spazio circostante, ed espressa in Watt.

Possiamo tuttavia essere interessati a conoscere la potenza emessa/ricevuta in riferimento all'estensione del corpo emettitore/ricevitore che può a sua volta essere espressa come superficie o come un angolo di emissione.

Intensità radiante o energetica (I_r) è il flusso radiante emesso da una **sorgente puntiforme** in una certa direzione nell'unità di angolo solido, ed espressa in watt su steradiano (W/sr);

Emittanza radiante o energetica (Me) è invece il flusso radiante emesso da una sorgente estesa per unità di superficie, in watt su metro quadrato (W/m^2);

Irradianza (E_e): è invece il flusso radiante **incidente** su una superficie ma sempre espresso in watt su metro quadrato (W/m^2).

La terminologia è immutata quando, nel caso l'emissione non sia monocromatica, essa si riferisce ad un intervallo di frequenze, nel cui caso le unità fanno riferimento all'unità di lunghezze d'onda (es. W/nm).

1.2. La radiazione termica

Gran parte dell'energia proveniente dal sole è destinata a convertirsi in **calore**, il quale determina un'innalzamento della **temperatura** (T) del corpo irraggiato. La temperatura si misura comunemente in gradi Celsius ($^{\circ}C$) o centigradi, e gradi Fahrenheit: $T(^{\circ}F) = 32 + T(^{\circ}C) \cdot 1.8$, benchè gli studi di termodinamica abbiano introdotto il K (Kelvin): $T(K) = T(^{\circ}C) + 273.2$.

La misura della temperatura - La temperatura è responsabile della dilatazione dei corpi, fenomeno debolmente rilevabile nei solidi, molto più nei fluidi. Il mercurio (Hg) è un metallo che alla temperatura ambiente è liquido ed è stato utilizzato nei termometri, sostanzialmente costituiti da una colonnina capillare trasparente in cui un'espansione del liquido determina un allungamento della colonna di fluido, il cui menisco è osservabile al fianco di una scala graduata ottenuta attraverso una appropriata taratura.



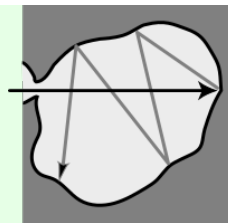
La Temperatura è una grandezza che misura il grado di agitazione molecolare di una sostanza. Ma l'agitazione comporta anche urti con trasferimento di energia agli elettroni degli atomi coinvolti, che passano

²Il concetto di **grado** ($^{\circ}$) si basa sul prendere due estremi e dividere l'intervallo in un certo numero di parti uguali: nel caso del Celsius, si usano come estremi la temperatura di rugiada e quella di ebollizione dell'acqua in condizioni Standard (1 atm) dividendo l'intervallo in 100 parti uguali.

in uno stato energetico eccitato, ovvero su orbitali (atomici o molecolari) con energia superiore. Gli orbitali rappresentano i livelli energetici discreti, per cui quando, quasi immediatamente questi elettroni si rilassano, emettono REM emessa ha una frequenza stabilita dal *salto quantico* effettuato. In presenza di reazioni termochimiche, come in una fiamma, si verificano più salti quantici, per cui quello che si ottiene è uno *spettro* di emissione costituito da numerosi picchi prodotti da tutte le sostanze coinvolte nella combustione.

La fisica statistica sviluppata all'inizio dal '900 ha dimostrato che tale processo avviene anche in assenza di una fiamma e che l'energia posseduta da un corpo genera REM con uno spettro con caratteristiche che dipendono unicamente dalla temperatura T del corpo.

La teoria del Corpo Nero, sviluppata a cavallo tra '800 e '900, è quella che ha portato alla legge di Planck. Per corpo nero si intende un corpo idealizzato in termini di una cavità dotata di una piccola fessura (si pensi all'occhio), in cui l'energia entrante equivale a quella uscente dopo un processo di profondo **mutamento**



Secondo la teoria lo spettro della radiazione uscente è rappresentato da una distribuzione continua espressa dalla **legge di Planck**:

$$J(\nu, T) = \frac{8\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

In questa distribuzione sono presenti **tutte le lunghezze d'onda**, l'emissività J dipende esclusivamente dalla temperatura T (vedi figura sotto) in quanto c , h e k sono costanti universali:

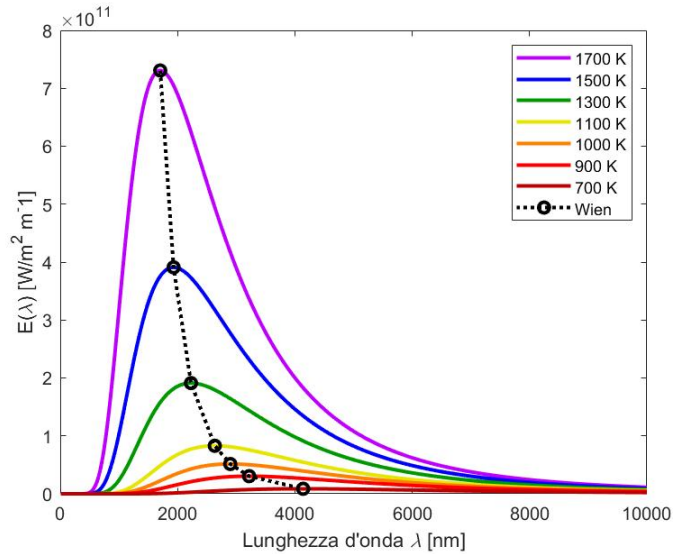
- h costante di Planck = $6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$,
- k costante di Boltzmann = $1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$.

L'espressione rappresenta una densità di emissione per unità di lunghezza d'onda λ , per cui per ottenere il potere emissivo della sorgente (in W) occorre specificare un intervallo di unità di lunghezze d'onda.

Tale distribuzione è contrassegnata da un unico picco la cui posizione (frequenza a cui è massima l'emissione) e altezza (intensità della radiazione a quella frequenza) dipendono unicamente dalla temperatura, come evidenziato dalla linea tratteggiata.

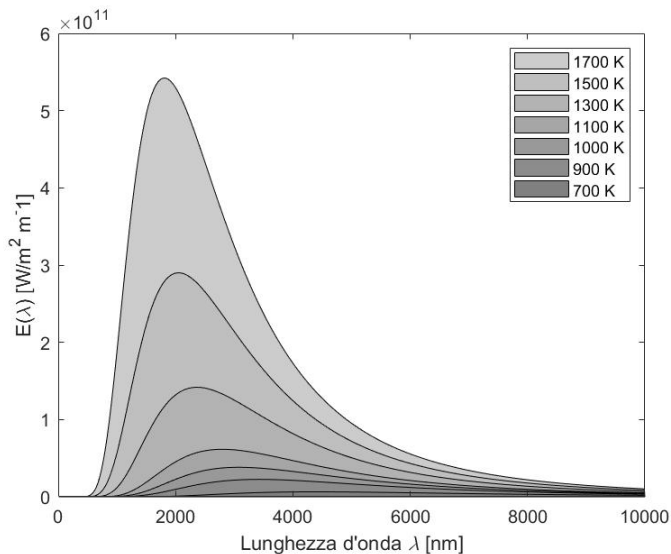
La relazione tra posizione del picco e temperatura è nota come Legge di Wien:

$$\lambda_{max} = \frac{2.898 \cdot 10^{-3}}{T}$$



Distribuzione di emissione della radiazione termica in funzione della lunghezza d'onda

1.2.1. La legge di Stefan-Boltzmann. Benché ogni corpo emetta REM di ogni frequenza, la *potenza emissiva* emessa da un corpo per unità di superficie complessivamente su tutte le frequenze è rappresentato dato dall'area sottesa dalla curva.



Rappresentazione dell'area della distribuzione di Planck per diversi valori di T assoluta

Questo valore dipende unicamente dalla temperatura assoluta, secondo la legge detta di Stefan-Boltzmann:

$$J = \sigma \cdot T^4$$

La costante che appare nell'espressione, detta di Stefan - Boltzmann ($\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$) riassume le costanti viste nelle espressioni precedenti.

1.2.2. Legge di Kirchoff. La legge di Stefan-Boltzmann vale nell'assunzione che il corpo caldo si comporti come un **corpo nero perfetto**, rispettando le ipotesi di omogeneità di temperatura e assenza di riflessioni: per i corpi reali è comune applicare un coefficiente correttivo, detto **emissività specifica** ϵ , per cui per i casi reali l'equazione di Stefan-Boltzmann va applicata come segue:

$$J = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

Nella tabella a fianco sono riportati alcuni valori di emissività per alcune superfici naturali a $T = 20^\circ \text{C}$ (per $\lambda = 5 : 100 \text{ nm}$) in cui si osserva che il valore del coefficiente correttivo non si discosta in modo rilevante dall'unità.

Sostanza	ϵ
Neve	0.99
Ghiaccio	0.92
Acqua	0.86
Terreno Nudo	0.97
Vegetazione	0.94

La differenza col corpo nero ideale si riflette anche sulle proprietà di assorbimento. A tal proposito vale la legge di Kirchoff, che stabilisce che per il principio di conservazione dell'energia l'energia incidente (J_I) deve equivalere alla somma di quella Assorbita (J_A), quella riflessa (J_R) e quella Trasmessa (J_T), rispettando quindi il bilancio:

$$J_I = J_A + J_R + J_T$$

L'espressione può essere espressa anche nella forma di coefficienti di assorbanza α , riflettanza ρ e trasmittanza τ :

$$1 = \alpha + \rho + \tau$$

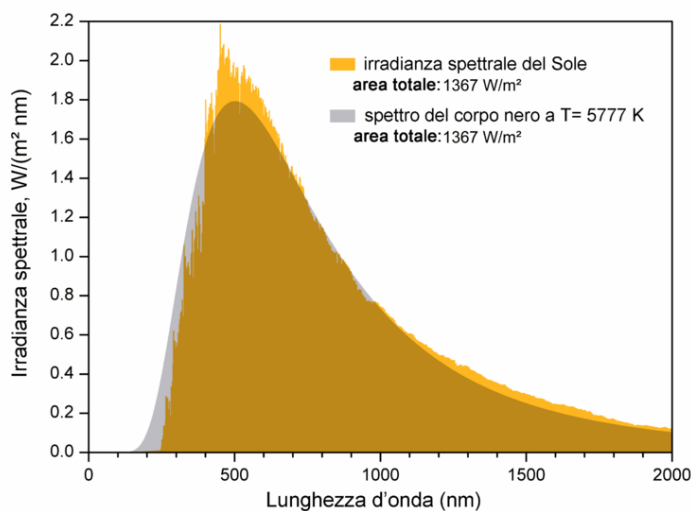
Sempre per la conservazione dell'energia segue anche che, per un corpo è opaco ($J_T = J_R = 0$), in condizioni stazionarie il flusso entrante deve equivalere a quello uscente $J_A = J_I$ (altrimenti la sua temperatura aumenterebbe) per cui l'assorbanza deve essere pari all'emittanza:

$$\epsilon = \alpha$$

1.3. L'Irraggiamento Solare

Il sole è una sorgente da noi così lontana da poter essere considerata quasi puntiforme: di fatto ha una grandezza di c.ca **32'** (mezzo grado), la cui intensità di irraggiamento solare alla sommità dell'atmosfera terrestre (J , $Watt/m^2$) può essere considerata in prima battuta pressoché costante, prendendo il nome di **costante solare** e vale c.ca $1370 W/m^2$. Tale valore rappresenta pressoché il massimo valore di radiazione che potremmo osservare al suolo su una superficie perpendicolare ai raggi solari, con un'atmosfera estremamente limpida ³.

Lo spettro della radiazione solare alla sommità dell'atmosfera è assai simile a quella di un corpo nero teorico alla Temperatura di $5780K$ che è interpretata come Temperatura superficiale del Sole, pur mostrando tutte le differenze che ci si può attendere da un sistema fisico reale (figura da [22]). Una delle prove della validità della teoria del Corpo Nero è data proprio dalla capacità di spiegare la forma dello spettro solare.



Distribuzione osservata del Sole confrontata a quella di un corpo nero alla Temperatura di $5780K$

³in realtà condizioni particolari di nuvolosità possono determinare una concentrazione dei raggi solari portando a valori locali temporaneamente anche superiori

Termometria e visione a infrarossi - Le leggi di Planck e di Wien sono correntemente utilizzate in termometri, sensori e telecamere ad infrarossi per dedurre la temperatura di un corpo (o di un punto di esso) a partire dalla frequenza ottenuta con radiometri, sensori che rispondono alle REM non visibile. Questi sensori sono in grado di misurare l'intensità della sorgente in corrispondenza di alcune frequenze, da cui la logica interna ricostruisce la curva ipotetica quindi stima la posizione del picco, da cui la temperatura corrispondente. Dall'uso di queste leggi che si può stimare sia la T che la distanza del Sole.

1.4. La luce

Molta parte della radiazione solare costituisce ciò che chiamiamo luce, data dall'intervallo di frequenze di radiazione percepibile dall'occhio umano, ovvero con lunghezze d'onda comprese nell'intervallo 400 – 800 nm che rappresenta c.ca la metà della radiazione che ci giunge dal sole.

Colore	Lunghezza d'onda (nm)	Colore	Lunghezza d'onda (nm)
violetto	380 – 450	giallo	570 – 590
blu	450 – 495	arancio	590 – 620
verde	495 – 570	rosso	620 – 780

Tenendo conto della curva di risposta alla luce dell'occhio umano si possono discriminare due aspetti, la **sensibilità** e la **composizione cromatica**. Per quanto riguarda il primo aspetto, l'occhio, come gli altri sensi reagisce al livello di luminosità adattandosi ad intensità molto diverse. Per la luce le unità di misura sono quelle **fotometriche**; ecco quelle più usate:

- **Flusso o potere luminoso** (J_v); si misura in **Lumen (LM)** - 1 LM corrisponde ad una sorgente con un potere emissivo che alla frequenza di 555 nm vale 1/683 Watt;
- **Intensità luminosa** (I_v), in candele (CD) - 1 CD = LM/ster
- **Illuminanza** (E_v), ovvero luce incidente su una superficie, che si misura in **Lux** - 1 Lux = 1LM/m².

Per quasi tutti gli ambienti che non sono direttamente illuminati del sole, e quindi ambienti ombreggiati e interni, le unità fotometriche sono preferite a quella *radiometrica*; ne consegue l'uso di una differente strumentazione: anziché radiometri useremo luxmetri o esposimetri. In tabella sono riportati alcuni valori di luminosità caratteristici di alcuni ambienti.

condizione	Lux
Luce solare diretta	50,000
Luce del giorno diretta con cielo sereno	10,000-20,000
Luce del giorno con cielo coperto	1,000-5000
Interno ufficio	200-500
Minimo per una lettura confortevole	300
Illuminazione corridoi e zone di lavoro esterne	50-100
Tramonto	10-1
Illuminazione pubblica su strada principale	15
Illuminazione pubblica su strada secondaria	5
Notte luna piena	0.3
Notte con quarto di luna	0.1
Notte senza luna con cielo stellato	0.001
Notte senza luna con cielo coperto	0.0001

1.4.1. Il Colore. È noto che nell'occhio umano (nella retina) sono presenti due tipologie di fotorecettori, i coni e i bastoncelli, con diverse curve di sensibilità: i coni operano ad alta luminosità (visione fotopica) mentre i bastoncelli hanno un'azione che prevale a bassa luminosità (visione scotopica).

La percezione del colore è legata alla presenza di recettori con una diversa risposta alle frequenze che sono in grado di inviare al cervello informazioni, che noi ricostruiamo in ciò che chiamiamo colori. Durante l'evoluzione gli occhi delle specie animali hanno ospitato pigmenti diversi tant'è che gli uccelli hanno una visione basata su 4 tipi di pigmenti (quadricromia), mentre i primati hanno acquisito una modalità visiva basata su 3 pigmenti [9].

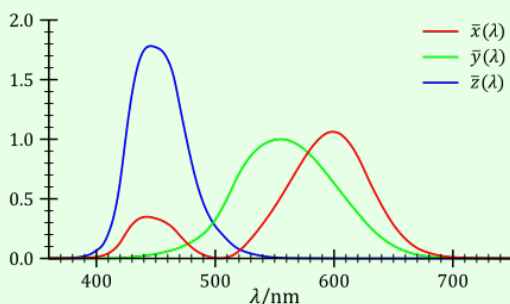
1.4.2. Luci artificiali. Per millenni l'illuminazione artificiale è stata basata sulla combustione (lampade ad olio, candele,...). È nell'1800 che nasce la **lampada ad incandescenza** (Coolidge & Edison), data dal passaggio di una corrente elettrica attraverso un filamento metallico sufficientemente sottile da determinarne un surriscaldamento che lo porta all'incandescenza. Mentre inizialmente il problema era la durata dei filamenti, successivamente l'obiettivo era raggiungere temperature di esercizio sempre più elevate, consapevoli che l'efficienza emissiva aumentava con la temperatura (L.di Stefan-Boltzmann).

Le **lampade alogene** sono l'evoluzione delle lampade ad incandescenza; in esse continua ad esistere un filamento, ma sono dotate di una significativa innovazione, quella del ciclo alogeno: il tungsteno del filamento che evapora a causa della temperatura elevata reagisce con un gas alogeno formando un alogenuro di tungsteno che si ri-deposita sul filamento stesso decomponendosi nuovamente in tungsteno metallico. La tecnica ha permesso di raggiungere temperature di esercizio (e

di colore - vedi sotto) molto elevate, con uno spettro di ottima qualità (ancora in gran parte termico).

Modelli di colore - I modelli di colore sono modelli che rappresentano il colore come risultante (vettoriale) di più informazioni quali 3 colori fondamentali come nel modello CYM, RGB, o XYZ, ovvero 3 frequenze che contraddistinguono la sensibilità dell'occhio umano come nel modello CIE rappresentato in figura; nei modelli HSL ed HSV esiste una sola informazione che rappresenta il colore (Hue) ma due sono i gradi di libertà riservati al modo in cui tale colore può essere percepito, saturazione (S) ed intensità (Level, Value).

Nella figura (da [1]) è riportata la distribuzione teorica delle tre componenti percettive dell'occhio umano utilizzate nei modelli CIE [4].



Oltre alle lampade a combustione, anche quelle ad incandescenza ed alogene sono ormai storiapassate con il divieto di commercializzazione nell'EU sia delle prime (nel 2012) che delle seconde (dal 2018).

Le **lampade a scarica** sono basate sulla sostituzione della tecnica di generazione di luce attraverso l'*attrito* generato dall'attraversamento di elettroni in un conduttore di bassa sezione, con una basata sull'*eccitazione* di atomi in una atmosfera debolmente conduttrice e conseguente *rilassamento*. Esse comprendono molte delle lampade professionali utilizzate nelle illuminazioni pubbliche, campi sportivi e serricoltura. Molto diffuse sono le lampade a Fluorescenza (FL) che includono i diffusi 'tubi al neon'.

I fulmini - Le lampade a scarica così come in molti altri apparecchi elettronici precedenti all'avvento dei semiconduttori, come tubi catodici dei vecchi televisori, valvole termoioniche etc, si racchiude un processo che in natura è quello alla base di fulmini. Il fulmine si genera poiché nello sviluppo dei temporali ci sono enormi accumuli di cariche nelle nubi, che a certo punto vanno a scaricarsi a terra attraverso *cammini preferenziali* che tipicamente terminano su cuspidi altamente conduttive. (immagine da [10])



Lumileds - Dal 2005 il mercato dell'illuminazione artificiale è stato rivoluzionato dall'avvento di una nuova tecnologia, quella dei LED⁴ ad alta luminosità, i lumileds. Oggi i lumileds hanno invaso tutti i settori, sostituendosi alla maggior parte delle lampade pre-esistenti nella gran parte delle applicazioni grazie ad una maggior efficienza energetica.

1.4.3. La Luminosità delle lampade. Nel caso delle lampade può risultare importante saper tradurre informazioni di **potenza** (consumo) in **luminosità**. Allo scopo si fa uso dell'efficienza luminosa di una lampada, solitamente riportato dalla casa costruttrice, che si basa sulla forma dello spettro luminoso:

Tipo di Lampada	η (lumens/watt)
A incandescenza (filamento di tungsteno)	12.5-17.5
Alogena	16-24
A fluorescenza	45-75
LED	30-90
Ioduri metallici	75-100
Vapori di Hg	35-65
Vapori di Na - HP	85-150
Vapori di Na - LP	100-200

Il basso consumo che le caratterizza deriva dal fatto che lo spettro di emissione non è completo, cioè non include l'intera gamma di frequenze che contraddistingue una lampada 'termica'.

A causa di questa incompletezza nel 'simulare' la radiazione solare, tali lampade puntano sulla capacità dell'occhio umano nello 'smussare' i picchi, ricostruendo così una percezione della luce simile a quella diurna.

La Temperatura di Colore è un concetto che sfrutta l'equazione di Planck che determina una relazione tra la temperatura assoluta e la frequenza di picco ovvero quel colore dominante, e che determina la tonalità della lampada. Tale criterio è oggi utilizzato per classificare le lampade, specie i tubi a scarica, in cui il 'colore' è data in forma di temperatura equivalente. Si rimarca che, come detto sopra, tale corrispondenza non è ottenuta sulla base dello spettro, che per queste lampade è solitamente ben diverso da quello di una radiazione termica, ma basandosi sulla curva di risposta dell'occhio umano. Ecco una tipica tabella di corrispondenza:

⁴Light Emitting Diode, ovvero diodi ad emissione luminosa: l'ildiodo è un dispositivo elettronico a semiconduttore che permette il passaggio di corrente elettrica in una sola direzione

T(K)	tipo di luce
2000-3000	luce calda dai toni giallognoli
3000-4500	luce naturale bianca
4500-7000	luce fredda dai toni azzurrognoli

Nelle lampade a scarica i diversi gas utilizzati permettono di ottenere temperature di colore che vanno dai 2000 ai 5400K. Anche quelle a fluorescenza hanno un ampio range di temperatura di colore, più spostato sui colori freddi: 3000-6500K.

1.4.4. Il condizionamento della luce. Il colore di una sorgente può essere cambiato apponendo tra la sorgente e la superficie illuminata dei **filtri** cioè materiali semitrasparenti in grado di limitare o impedire il passaggio di alcune componenti.

Filtri fotografici - La fotografia analogica tradizionale fa uso da tempo di schermi tipicamente in materiale vetro/plastico in grado di operare un filtraggio selettivo della luce. Tali filtri si possono rendere necessari anche per effettuare correzioni cromatiche indotte dalle lenti del dispositivo fotografico. Con la fotografia digitale tale filtraggio può essere applicato in diversi momenti, da quello in cui è catturata l'istantanea, alla elaborazione finale grazie all'uso di software appropriato. Un settore commerciale che fa abbondante uso di filtri è quello degli occhiali da sole, ma anche vetri per finestre e finestrini (auto) possono inglobare materiali atti a filtrare delle componenti luminose.

I materiali utilizzati nelle superfici trasparenti incidono tantissimo sul filtraggio di componenti fuori dal visibile, ad esempio:

- quarzo : trasparente agli UV
- vetri e cristalli : opaco sia agli UV che all'IR

Data la variabilità dei materiali i dati tecnici sono disponibili per materiali specifici usati per prodotti commercializzati (composizione e spessori). In particolare, per quanto riguarda i prodotti plastici, gli UV possono determinare un forte deterioramento per cui il produttore mette in risalto la resistenza rispetto a questo agente.

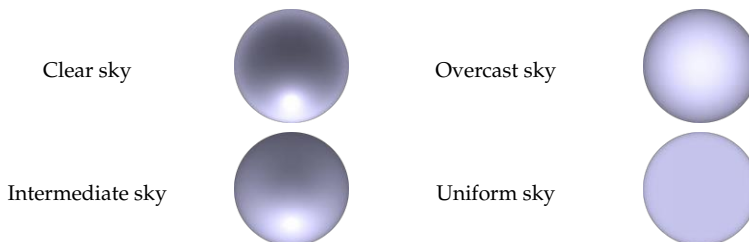
Il **colore di un oggetto** può essere comunque profondamente diverso da quello della sorgente che lo illumina. Il materiale infatti agisce come un filtro, assorbendo dalla luce certe componenti e restituendo per trasmissione, riflessione e diffusione le rimanenti. Ogni superficie è contraddistinta da un aspetto in cui, assieme al colore giocano un ruolo importante traslucenza, trasparenza, rugosità, disomogeneità (presenza di particelle come nelle vernici metallizzate). A bassa luminosità (buio) il colore sarà prossimo al nero mentre ad alta luminosità il colore si avvicinerà a quello della sorgente. Inoltre mentre il colore della luce risultante di più sorgenti è ottenuto con un modello sottrattivo, il colore di una sostanza ottenuta miscelando pigmenti diversi ha un modello additivo.

Il rendering - nelle applicazioni di realtà virtuale, dai programmi di progettazione ai videogiochi, la simulazione realistica dell'illuminazione degli ambienti e degli oggetti in essi rappresentati è molto importante. Per questo questi software inglobano una componente di calcolo molto importante, in cui sono simulate sorgenti puntuali, vicine e angolari e diffuse, presenza di un'atmosfera, trasparenze, specularità che variano al varare del punto di vista dell'osservatore per cui la cui complessità dei calcoli spesso richiede l'uso di processori dedicati (schede grafiche).

1.5. L'atmosfera terrestre

Lo studio dell'atmosfera caratterizza materie quali la fisica dell'atmosfera, meteorologia e climatologia fornendo supporto alla navigazione nautica e successivamente a quella aeronautica. La climatologia è invece associata a studi botanici e sociali in cui è studiato in tutte le sue sfaccettature il rapporto tra ambiente ed organismi. La fisica dell'atmosfera descrive le dinamiche atmosferiche attraverso il rigore della fisica portando allo sviluppo degli oggi diffusi modelli previsionali.

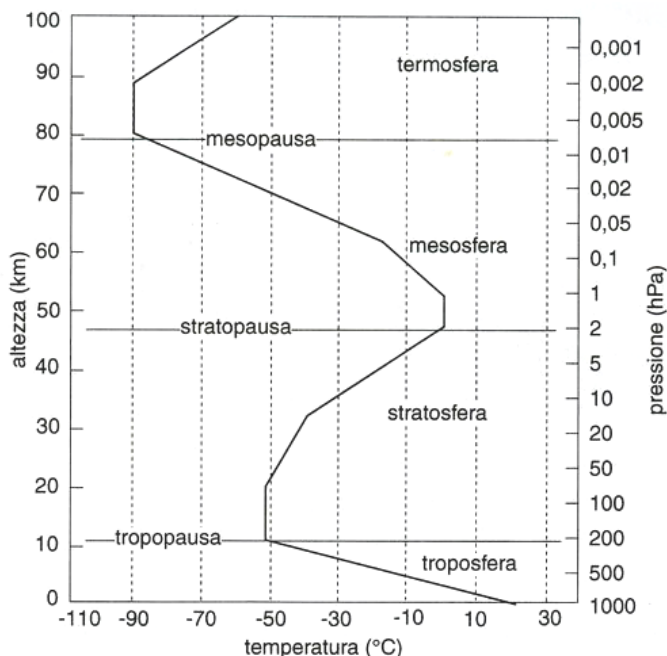
1.5.1. Cielo. Per millenni l'uomo ha faticato a percepire l'esistenza dell'atmosfera, identificandola unicamente come **volta celeste**. La meteorologia si è staccata dall'astronomia quando ci si è resi conto che atmosfera e sfera celeste erano due cose distinte. Oggi con **cielo** intendiamo una sorgente luminosa che nelle ore di luce ed in assenza di copertura nuvolosa è di colore 'celeste' appunto, oggetto di standardizzazione da parte del CIE (Comitè International de l'Eclairage, [11]) che ha definito una serie di Cieli Standard utilizzati per la progettazione ambientale, determinati da una distribuzione di emissività su due angoli (azimuth e zenith). In questi modelli si può osservare il variare della luminosità con l'Altezza che con l'Azimuth, la possibilità di localizzare il sole (a mezzogiorno) che scompare a mano a mano che si va dal cielo sereno a quello coperto.



Quattro importanti cieli standard CIE

1.5.2. Struttura dell'atmosfera. L'atmosfera terrestre è quel corpo gassoso dello spessore di poche centinaia di *km* trattenuto al suolo dalla gravità: le variabili che lo caratterizzano, a cominciare da densità e pressione variano con l'altezza assieme a temperatura e composizione, data questa da una miscela gassosa pressoché trasparente alla luce. Nell'atmosfera è possibile individuare una stratificazione seguente:

- troposfera – strato superficiale dello spessore di c.ca 8 *km* ai poli e c.ca 17 *km* all'equatore. La pressione atmosferica, pari a c.ca 1013 *mbar* al suolo, è di c.ca 850 *mbar* a 1000 *m* e di c.ca 500 *mbar* a 5000 *m* mentre la temperatura diminuisce con l'altezza ad un tasso di $7 - 10^{\circ}\text{C}/\text{km}$. La troposfera è lo strato interessato dalle nubi originate dalle abituali perturbazioni.
- stratosfera è uno strato di atmosfera che raggiunge l'altezza di c.ca 50 *km*, in cui è possibile notare un graduale riscaldamento (da -60°C si risale fino a c.ca -10°C); benché l'atmosfera sia più rarefatta l'ossigeno presente assorbe l'energia solare riscaldandosi. Gli aerei di linea viaggiano all'estremo inferiore di questa regione dell'atmosfera, alle medie latitudini tipicamente a 10 *km* di altezza, in cui sono fenomeni di instabilità atmosferica sono pressoché assenti. Nella stratosfera si originano inoltre correnti a getto molto forti di cui gli aerei riescono a trarre vantaggio nelle lunghe percorrenze.



Schema della struttura dell'atmosfera

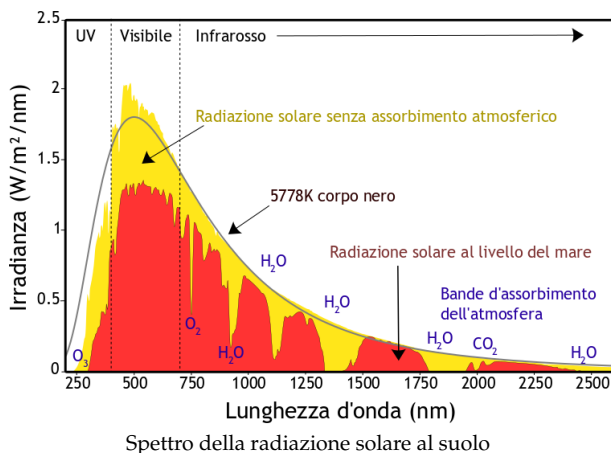
- mesosfera – strato di atmosfera che raggiunge i 100k di altezza, in cui la rarefazione dei gas fa sì che il bilancio termico si a negativo e che la temperatura scenda a -100°C ;
- termosfera – strato di atmosfera in cui vi è una graduale rarefazione di gas che però, esposti direttamente ai raggi solari, si riscaldano fino ad assumere temperature molto alte (anche 2000°C). I primi 600 km prendono il nome di *ionosfera* in quanto costituita da gas ionizzati in grado di riflettere le onde lunghe; viene chiamata invece *esosfera* la parte più esterna.

Le regioni sono connesse da regioni di transizione denominate rispettivamente tropopausa, mesopausa e stratopausa che si distinguono principalmente da un diverso andamento delle temperature.

1.5.3. L'atmosfera terrestre come miscela gassosa. La composizione della parte di atmosfera più prossima al suolo (troposfera) è quella che maggiormente ci interessa in quanto maggiormente in relazione alla vita sul pianeta Terra e riportata in Tabella, in cui si vede come l'atmosfera sia essenzialmente dominata da due gas, uno particolarmente reattivo, l'Ossigeno (O_2 , 21% circa) ed uno sostanzialmente inerte, l'Azoto (N_2 , 78%).

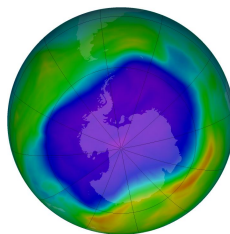
Componente (gas)	Formula	Concentrazione
Azoto	N_2	78.08%
Ossigeno	O_2	20.94%
Argon	Ar	0.9340%
Anidride carbonica	CO_2	330ppm
Neon	Ne	18.00ppm
Elio	He	5.20ppm
Metano	CH_4	1.65ppm
Criptone	Kr	1.10ppm
Idrogeno	H_2	0.58ppm
Protossido di azoto	N_2O	0.33ppm
Xenone	Xe	0.09ppm
Ozono	O_3	10 – 100mg/kg
Monossido di Carbonio	CO	10 – 200mg/kg
Anidride Solforosa	SO_2	0.01 – 0.1mg/kg
Ossidi di Azoto	$\text{NO} : \text{NO}_2$	0.001 – 10mg/kg

1.5.4. L'Atmosfera come filtro ottico. I gas atmosferici sono diversamente trasparenti alla radiazione solare. Ognuno di essi determina perciò un filtraggio della radiazione solare, facendola allontanare dallo spettro 'termico' visto in precedenza: in figura (da [12]) è riportato lo spettro solare al suolo in condizioni di cielo sereno.



IL'ultravioletto - L'intensa colorazione dei fiori di montagna è attribuita alla più ricca composizione della radiazione solare in alta quota, dove il ridotto spessore dell'atmosfera porta ad un minor assorbimento di alcune componenti della radiazione solare, tipicamente quella a maggior energia, blu-violetto. A quell'altezza diventano non trascurabili anche componenti di REM di frequenza anche maggiore quale l'ultravioletto (UV), che possono essere molto dannose per gli organismi viventi, gran parte della cui intensità si riduce nell'alta atmosfera per la presenza di ozono (O_3) in grado di assorbire gran parte di questa radiazione UV.

Il buco dell'Ozono - Alla fine degli anni 1970 alcuni ricercatori hanno cominciato a rilevare nella **stratosfera** la riduzione della concentrazione di ozono (O_3), una molecola composta di 3 atomi di ossigeno, avente la capacità di assorbire la componente ultravioletta (UV) del sole; tale riduzione è stata imputata alle emissioni di gas utilizzati nel ciclo frigorifero (es. CFC, poi messi fuori legge). Il buco dell'ozono, seppure ridimensionato negli anni, permane sul polo sud e si rende particolarmente pericoloso alle basse latitudini nel periodo estivo, quando i raggi solari giungono sulla terra con un basso angolo per chi vive nelle parti più estreme dell'emisfero australe. L'immagine riporta il buco dell'ozono nel 2006 ([16]).

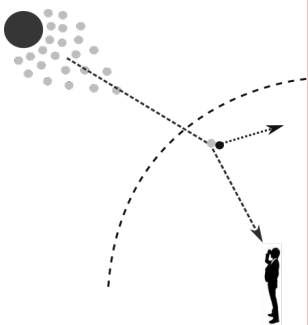


Una diversa composizione atmosferica (es. presenza di inquinanti) o una diversa incidenza dei raggi solari può determinare una diversa composizione dello spettro luminoso e quindi una diversa colorazione del cielo. Mentre la presenza di nuvole o nebbia appiattisce i colori

uniformando tutte le componenti della radiazione luminosa al punto di trasformarla in perfetta luce bianca.

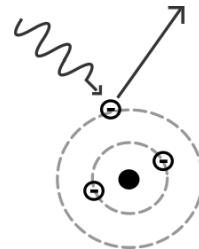
1.6. La natura particellare della radiazione

Fin dalle prime ricerche pioneristiche sull'elettromagnetismo ('800) si è constatato che all'aumentare della frequenza la REM inizia ad essere sempre più direzionata (**raggi**) ed 'impacchettata' assumendo un carattere **particellare**: nel caso della luce le particelle sono denominate **fotoni**. Tale comportamento è alla base di un fenomeno quale l'azzurro del cielo o dell'effetto fotoelettrico.



L'azzurro del cielo - La colorazione azzurra del cielo e dell'acqua di mare sono dovute all'effetto Reileigh, dovuto allo 'scattering' dei fotoni sui gas atmosferici. L'effetto ha un'intensità crescente con la frequenza ($\propto 1/\lambda^4$), per cui le frequenze più prossime al violetto sono maggiormente diffuse, al contrario di quelle meno energetiche che invece vengono assorbite dai gas. Il fenomeno si accentua all'alba e al tramonto quanto il sole è più basso sull'orizzonte, per via della rifrazione che permette di sopravvivere alla radiazione più vicina al rosso.

L'effetto fotoelettrico - La tecnologia del fotovoltaico oggi diffusamente utilizzata per la generazione alternativa di elettricità, si basa sull'effetto fotoelettrico in cui i fotoni scalzano elettroni dall'atomo cui sono legati, come in un urto tra biglie.

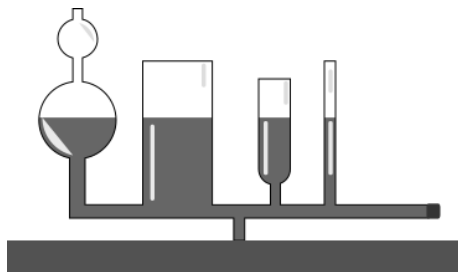


1.7. Fluidostatica

L'atmosfera e gli oceani hanno molto in comune: entrambi sono fluidi e quindi non posseggono dimensioni e forma propri, ma posseggono una massa e quindi sono soggetti alla forza di gravità e ciò fa sì che entrambi siano confinati nelle depressioni del pianeta dall'effetto della gravità terrestre. La fluidostatica è lo studio del comportamento di un fluido in equilibrio, ed è descritta principalmente da tre leggi.

La prima è data dal principio di **Pascal** che stabilisce che la pressione è una variabile scalare, senza una direzione di applicazione privilegiata: il fluido trasferisce la forza esercitata in un suo punto uniformemente su tutta la superficie del recipiente, perpendicolarmente alla superficie stessa.

La seconda legge, di **Torricelli**, è anche nota come **principio dei vasi comunicanti**: se si versa un liquido in un contenitore con forma qualunque il fluido si ridistribuisce raggiungendo ovunque la stessa altezza, come raffigurato in figura per vasi con forma e sezione diversa



Il sifone - Si tratta di un sistema di conduzione per liquidi con particolari funzioni. Nei lavabi e nelle condutture domestiche serve ad impedire il passaggio di maleodori all'interno delle abitazioni. Sistemi a sifone si possono innescare in natura (grotte, falde acquifere) permettendo l'acqua di fluire attraverso impedimenti. La permanenza di acqua in zone basse può però generare effetti negativi, quali facilitare la deposizione di uova di insetti (zanzare) o condizioni di anaerobiosi (es. sifone nei pluviali).

La terza legge è quella di **Stevin**, che stabilisce che in un fluido la pressione cresce univocamente in funzione della profondità (h, m) determinando una pressione:

$$P = \rho \cdot g \cdot h$$

dove $g(9.81 \text{ m/s}^2)$ è la forza di gravità e $\rho(\text{kg/m}^3)$ la densità del fluido.

I subacquei sanno che a profondità crescente, la pressione aumenta di un valore pari alla pressione atmosferica terrestre al suolo all'incirca ogni $10m$ di profondità.

1.7.1. Unità di misura della pressione. La pressione può essere espressa in diverse unità di misura. Poiché il Pascal (Pa) corrisponde ad un valore di pressione molto bassa, in alternativa al kiloPascal (kPa) o l'ettoPascal (hPa), si usa comunemente il Bar (o dove necessario il sottomultiplo mBar) pari a $100,000Pa = 100kPa = 1000hPa$. Tale valore molto vicino alla pressione atmosferica le cui misurazioni hanno portato alla definizione da parte del comitato di pesi e misure (CG-PM) dell'atmosfera (Atm), una definizione puramente convenzionale secondo cui $1Atm = 1013,25mBar$. In riferimento ad essa è definito il Torr = $1/760Atm$.

	Pascal N/m^2	Bar dyn/cm^2	Atm	Torr $mm\ Hg$	metri $m\ H_2O$
Pascal	1	10^{-5}			
Bar	100'000	1			
Atm	101'325	1.01325	1	760	10.33
Torr			1/760	1	
$m\ H_2O$					1

1.7.2. La pressione atmosferica. Anche se l'atmosfera è una miscela gassosa, quando si confronta ad un altro fluido lo fa sulla base delle stesse leggi. Torricelli fu il primo a realizzare che atmosfera ed oceani sono due fluidi a contatto l'uno dell'altro.

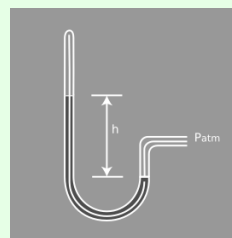
Utilizzando il principio dei vasi comunicanti e la legge di Stevin applicata a due fluidi diversi otteniamo il secondo principio della fluidostatica, che ci dice che, se si versano due liquidi non miscibili e con differente densità, i liquidi raggiungono altezze diverse. Infatti la pressione esercitata da ciascun liquido sull'interfaccia deve essere uguale:

$$\rho_1 g h_1 = P_1 = P_2 = \rho_2 g h_2$$

Anche se nel caso dei gas la legge di Stevin non è sufficiente ad esprimere le variazioni di pressione con l'altezza (a causa del variare della densità con la pressione) l'espressione rimane formalmente valida all'interfaccia ed il concetto fu utilizzato da Torricelli per misurare la pressione dell'atmosfera terrestre al suolo.

L'esperimento dell'argento vivo - Si tratta dell'esperimento che ha consegnato Torricelli alla storia, portando alla determinazione della pressione atmosferica. In pratica esso è basato sull'utilizzo di un sifone con un'estremità chiusa riempito di mercurio (Hg , $\rho = 13600\ Kg/m^3$) l'unico metallo che a temperatura ambiente è allo stato liquido, detto in passato argento vivo.

I due fluidi in gioco sono Hg e atmosfera. Poiché sull'estremità chiusa può gravare solo la colonna di Hg , mentre su quella aperta è l'atmosfera ad esercitare la pressione, la differenza di quota tra i due menischi del Hg equivale alla pressione esercitata dalla colonna d'aria sovrastante. Tale altezza è di c.ca $760\ mmHg$. In onore dello scienziato, il $mmHg$ prende il nome di *Torr*.



1.7.3. Il galleggiamento. Un'altra conseguenza delle leggi appena viste è il fenomeno del galleggiamento. Quando abbiamo a che fare con fluidi immiscibili con densità diverse, il fluido meno denso subisce una spinta verso l'alto: tale fenomeno si verifica anche all'interno di un fluido omogeneo o fluidi miscibili ma costituenti bolle di fluido più leggero

(temporaneamente) rese immiscibili dalle diverse condizioni fisiche (o dalla presenza di una parete, come nel caso di un natante).

L'entità della forza è espressa dal principio di Archimede: la forza verso l'alto esercitata su un corpo immerso è pari al peso del fluido spostato. Più in generale anziché di 'peso del fluido spostato' va considerata la differenza tra il peso del fluido spostato e quella del fluido che prende il suo posto⁵.

1.8. L'acqua

L'acqua, è la sostanza più presente in natura e alla sua presenza ed azione vanno imputate molte delle caratteristiche del pianeta terra e delle peculiarità degli organismi viventi. Quando gli scienziati cercano segni di vita negli altri pianeti o prove che vita possa esserci stata, cercano i segni lasciati dall'acqua (es. erosione).

Dal punto di vista chimico l'acqua è una sostanza inorganica composta di idrogeno e ossigeno, formula H_2O , peso molecolare 18.016, punto di fusione $0^\circ C$, punto di ebollizione $100^\circ C$.

Da questo fatto derivano la maggior parte delle singolari proprietà dell'acqua tra cui un eccezionale potere solvente.

L'acqua ha inoltre una capacità termica maggiore di molte altre sostanze, e quindi la capacità di immagazzinare enormi quantità di calore: per questo le grandi masse oceaniche sono in grado di condizionare il clima dell'intero pianeta. Tale caratteristica è anche il motivo del diverso comportamento di un suolo umido rispetto ad uno asciutto.

1.8.1. Il vapor d'acqua. La legge di **Dalton** afferma che la pressione totale di un gas è pari alla somma algebrica delle pressioni parziali dei gas costituenti la miscela.

Nel caso dell'aria secca la pressione P_{dry} è data dalla somma delle componenti:

$$P_{dry} = P_{N_2} + P_{O_2} + \dots$$

Poiché il vapor d'acqua è un gas, esso contribuisce al pari degli altri a determinare la pressione totale attraverso la propria pressione parziale, abitualmente indicata come e , per cui potremo dire che la pressione totale P_{tot} è pari a:

$$P_{tot} = P_{N_2} + P_{O_2} + \dots + e$$

L'**umidità relativa**, è il più diffuso modo di misurare la quantità di vapor d'acqua presente nell'aria, ed è data dal rapporto tra la pressione parziale e e quella massima possibile a quella temperatura e_s , ed è espressa in percentuale:

⁵La legge di Archimede trascura il peso dell'aria semplicemente perché è molto basso (c.ca 1/1000 dell'acqua)

$$UR = \frac{e}{e_s} \cdot 100$$

Attività - Il rapporto e/e_s è anche noto come attività (a_w). Esso è utilizzato nei quei settori dove l'umidità sia posta in relazione all'attività dei microorganismi (funghi, microbi,...) come nella scienza degli alimenti, microbiologia e micologia. L'umidità relativa è infatti un indicatore della presenza di acqua libera, ovvero non legata e quindi disponibile per gli organismi viventi presenti. Un valore di attività dell'80 è considerato sufficiente per lo sviluppo di muffe, batteri e funghi in ambiente controllato.

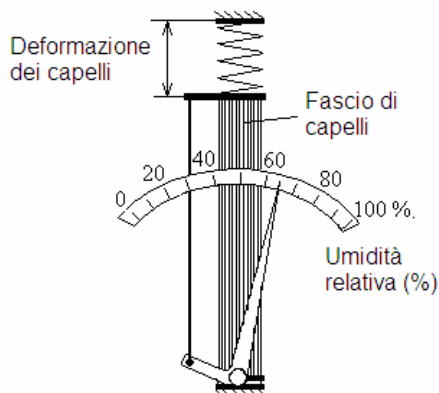
L'**umidità assoluta**, meno utilizzata, esprime invece il contenuto d'acqua sotto forma di vapore riferita all'unità di massa secca.

Il **deficit di pressione** di vapore (VPD) esprime invece la quantità di pressione che 'manca' all'atmosfera per raggiungere la saturazione:

$$VPD = e_s - e$$

La misura dell'umidità - La gran parte dei materiali con cui siamo a contatto, a partire dai tessuti e dalle fibre biologiche, ma anche materiali da costruzione, sono igroscopici: il vapore è catturato condensando all'interno dei capillari in funzione delle condizioni ambientali.

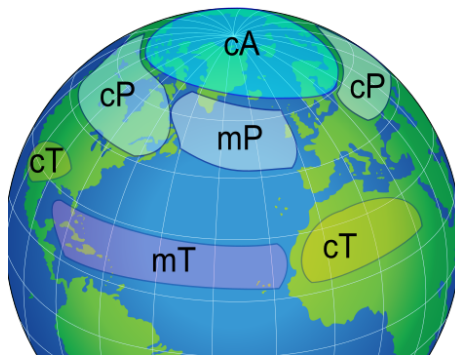
Tra questi materiali sono particolarmente sensibili le fibre vegetali ed animali. Per questo la misura dell'umidità negli strumenti meccanici del passato (alcuni ancora operativi) si fa uso di fasci di 'capelli' la cui struttura cheratinica ad elevata igroscopicità fa sì che la loro elasticità dipenda dall'umidità. In figura è riportato lo schema di igrometro a capelli ([17]).



1.8.2. Le masse d'aria. L'atmosfera non è un corpo omogeneo. Quando parti di atmosfera stazionano a lungo in una determinata regione del globo assumono caratteristiche temperatura e umidità tanto da permetterne una classificazione.

Le masse d'aria Polari (P) o Artiche (A) sono contraddistinte da basse o bassissime temperature, al contrario delle masse d'aria di origine tropicale (T) ed equatoriale (E) da temperature elevate. In termini di umidità si distinguono invece le marittime (m) dalle continentali (c). Ne emergono le seguenti combinazioni prevalenti alle medie latitudini:

cP fredda e secca
mP fredda e umida
cT calda e secca
mT calda e umida



Una tipica disposizione di masse d'aria sui mari e le terre emerse nel settore atlantico dell'emisfero boreale.

1.8.3. Nebbie e nubi. Sebbene quando pensiamo all'acqua liquida è più facile richiamare alla mente mari, fiumi e laghi, l'acqua è comunemente allo stato liquido anche nell'atmosfera: nubi nelle nebbie (nubi al suolo) sono infatti formate da goccioline d'acqua, di dimensione così piccola da galleggiare nell'aria.

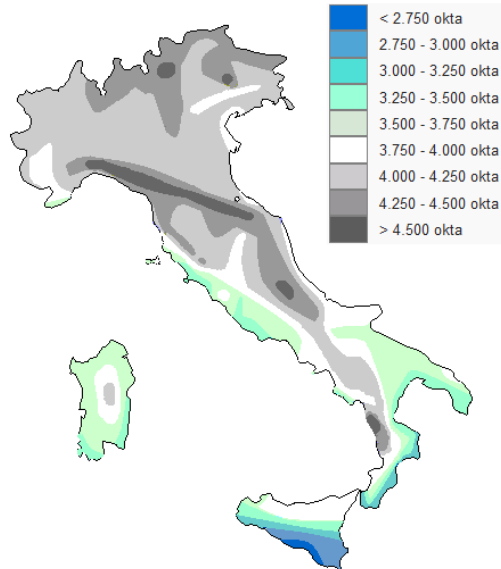
Sono proprio le goccioline a determinare una forte riduzione della trasparenza dell'atmosfera e conseguentemente della visibilità: nubi e nebbie sono causa di numerosi incidenti aerei, automobilistici e collisioni navali, tanto che la visibilità è una delle osservazioni cardinali compiute in aeronautica, condizione indispensabile per la navigazione aerea e marittima.

Tecnicamente si parla di nebbia quando la visibilità è inferiore ai 400m, di nebbia spessa se la visibilità è inferiore ai 200m e di nebbia densa se la visibilità scende al di sotto dei 40m; si parla invece di nebbia moderata se si percepiscono forme fino a 1km e di foschia per distanze superiori.

Lo sviluppo di nubi e nebbie è sintomo di un tasso di umidità prossimo al 100%; infatti se c'è nebbia è perché l'aria non riesce a contenere vapor d'acqua a sufficienza in forma gassosa. In presenza di emissioni essa può anche diventare ricettacolo di inquinanti dando luogo ad un altro fenomeno atmosferico poco amato, quello dello smog.

1.8.4. Misura della nuvolosità.

Il grado di nuvolosità è stato in passato stimato attraverso l'osservazione diretta, utilizzando p.es. la scala *Okta*, che esprime la copertura nuvolosa in ottavi (vedi figura, da [24]). Con **eliofania** si intende la durata dell'insolazione diretta, ovvero senza copertura nuvolosa.



1.9. Esercizi

Quesito - Di che tipo di energia è fonte il Sole ?

Quesito - Cos'è il calore ?

Quesito - Che cos'è la temperatura di un corpo ?

Quesito - Che legame esiste tra temperatura e calore ?

Quesito - Come si può misurare la temperatura ?

Esercizio - A quanti °C e K corrispondono 77°F ?

Risposta - $TF = 32 + TC \times 1.8 \rightarrow TC = (f - 32) / 1.8 = (77 - 32) / 1.8 = 45 / 1.8 = 25$;
 $TK = TC + 273 = 25 + 273 = 298$

Quesito - Cos'è la radiazione elettromagnetica ?

Quesito - A che velocità si propaga la radiazione elettromagnetica ?

Quesito - Come sono legate lunghezza d'onda e frequenza ?

Quesito - Conosci sorgenti di REM ?

Quesito - Quali processi sono alla base della generazione di REM ?

Quesito - Come percepiamo la presenza di REM ?

Quesito - Conosci sorgenti di REM ?

Esercizio - le radio che ascoltiamo in auto sono trasmesse in FM con frequenza portante dell'ordine dei 100MHz: qual'è la lunghezza dell'antenna adatta a riceverle ?

Soluzione - utilizzo la relazione tra lunghezza d'onda e frequenza:

$$\lambda = c/v = 3 \cdot 10^8 [m/s] / 100 \cdot 10^6 [1/s] \text{ ottengo } \lambda = 3m,$$

Esercizio - Date la lunghezza d'onda di 400 e 800 nm quali sono le frequenze associate ?

Soluzione - utilizzo la relazione tra lunghezza d'onda e frequenza:

$$\nu = c/\lambda = 3 \cdot 10^8 [m/s] / 4 \cdot 10^{-7} [m] = 6.67 \cdot 10^{14} Hz$$

$$\nu = c/\lambda = 3 \cdot 10^8 [m/s] / 8 \cdot 10^{-7} [m] = 3.33 \cdot 10^{14} Hz$$

Quesito - Che tipo di spettro è quello che presenta la legge di Planck ?

Quesito - Da quali variabili o fattori ambientali dipende la legge di Planck ?

Esercizio - riscriviamo la legge di Planck come funzione della lunghezza d'onda anziché della frequenza

Soluzione - sostituendo $c = \lambda \cdot \nu$ e otteniamo $u(\lambda, T) = \frac{2hc}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$

Quesito - Quali sono le unità di misura del flusso radiante ?

Quesito - Che differenza c'è tra emittanza e irradianza ?

Quesito - Cosa si intende per radiazione monocromatica ?

Quesito - Quali unità di misura ha l'emissività espressa dalla legge di Planck ?

Quesito - Da cosa dipende la posizione del picco emissivo della distribuzione di Planck ?

Quesito - Come si ottiene la λ_{max} del picco emissivo della radiazione termica emessa da un corpo ad una determinata temperatura T ?

Quesito - Come si ottiene la ν_{max} del picco emissivo della radiazione termica emessa da un corpo ad una determinata temperatura T ?

Quesito - Cosa dice la legge di Stefan-Boltzmann ?

Esercizio - Calcolare l'energia radiante emessa da corpi a 10, 100 e 1000°C

Soluzione- Occorre trasformare la temperatura da Celsius a Kelvina quindi elevare alla 4^a potenza e moltiplicare per la costante di Boltzmann. Il risultato è l'energia emessa per unità di superficie.

T (°C)	T (K)	T ⁴ (K ⁴)	J (W/cm ²)
10	10 + 273°C = 283K;	283 ⁴ = 6.41 · 10 ⁹	485
100	100 + 273°C = 373K;	373 ⁴ = 1.94 · 10 ¹⁰	1463
1000	1000 + 273°C = 12730K;	1273 ⁴ = 2.63 · 10 ¹²	198'534

Quesito - Cosa dice la legge di Kirchoff ?

Quesito - Cosa si intende per costante solare ?

Quesito - Quanto vale la costante solare? Specificare l'unità di misura.

Quesito - Come è stimata e quanto vale la temperatura superficiale del Sole ?

Quesito - Cos'è la luce ?

Esercizio - Se su una lampada commerciale troviamo riportata la dicitura 40W, l'indicazione a cosa si riferisce ?

Soluzione - 40W è il valore nominale (dichiarato dalla casa produttrice) della potenza elettrica assorbita dalla lampada. Solo parte di essa è convertita in luce.

Quesito - Il Lux cosa misura, la luce omessa o quella incidente ?

Quesito - Cosa si intende per colore ?

Quesito - Cosa determina il colore di una superficie ?

Quesito - Qual'è il principio di funzionamento di una lampada ad incandescenza ?

Quesito - Qual'è il principio di funzionamento di una lampada a scarica ?

Quesito - Quali sono le lampade a minor efficienza luminosa ?

Quesito - Quali sono le tipologie di lampade a maggior efficienza luminosa ?

Quesito - Cosa si intende per temperatura di colore ?

Quesito - Che significato attribuiamo alla dicitura 6000K che troviamo su una lampada ?

Quesito - Quali tipi di schermi opachi o semitrasparenti conosci che sono in grado di ridurre l'intensità della luce in un ambiente ?

Quesito - Quali materiali trasparenti e semi-trasparenti conosci che sono in grado di alterare la qualità della luce ?

Quesito - Pensando ad una lampadina che abbiamo sostituito più di recente, di che tipo ricordiamo che fosse e quale processo utilizza per l'emissione luminosa e in cosa differisce il suo spettro emissivo da quello solare ?

Esercizio - Supponiamo di avere una lampada da 1000 Watt con una efficienza luminosa $\eta = 30$, calcolare la luminosità e l'illuminazione sulle foglie di una pianta a 5m di distanza supponendo che essa sia perfettamente sferica?

Soluzione - poiché l'efficienza luminosa è misurata in lumen/W, la luminosità della lampada è di 30,000 lumen. Poiché tale luce sarà irraggiata uniformemente (essendo sferica) su una superficie di $s = 4 \pi r^2$ a 5m: $J = 30,000 / 4 \pi 25 \simeq 100 \text{Lux}$

Quesito - Cosa è il cielo ?

Quesito - Cosa intende il CIE per cielo ?

Quesito - Sapresti descrivere la struttura dell'atmosfera ?

Quesito - Come può essere caratterizzata la troposfera ?

Quesito - Quali sono i gas principali che compongono l'atmosfera terrestre ?

Quesito - Quali sono i gas che incidono maggiormente sulla radiazione solare al suolo ?

Quesito - Cosa si intende per fotone ?

Quesito - Che tipi di fluidi conosci ?

Quesito - I fluidi sono tutti soggetti alla forza di gravità ?

Quesito - Cosa dice il principio di Pascal ?

Quesito - Cosa dice la legge di Torricelli ?

Quesito - Cosa dice la legge di Stevin ?

Quesito - Cos'è la pressione ?

Quesito - Sapresti indicare alcune unità di misura della pressione ?

Quesito - Sapresti indicare un metodo per la misura della pressione atmosferica ?

Quesito - Cosa dice la legge di Archimede ?

Quesito - Sapresti spiegare il galleggiamento di una nuvola usando la L.di Archimede ?

Esercizio - Che pressione viene esercitata sulle pareti di un sottomarino alla profondità di 300 m ?

Soluzione - Poiché l'acqua è un fluido che possiamo considerare incompressibile, la densità sarà assunta costante: ($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$). A quella profondità, $P = 1000 \cdot 9.81 \cdot 300 \text{ Pa}$

Esercizio - Ricavare la pressione atmosferica in Pa corrispondente ai 760mm Hg sapendo che la densità del Hg è 13,6 kg/litro.

Soluzione - Applicando la legge di Stevino, $P = \rho \cdot g \cdot h$

$$P = 13600 \cdot 9.81 \cdot 0.76 = 101300 \text{ Pa} = 1013 \text{ hPa}$$

Esercizio - Che volume deve avere una mongolfiera per sollevare un peso di 100kg ?

Soluzione - supponendo che il peso della mongolfiera sia trascurabile, occorre utilizzare un volume di gas la cui differenza di peso rispetto a quella del gas circostante sia di 100 kg.

Supponiamo di riempire la mongolfiera con un gas di peso nullo, sostituendolo a quello dell'aria che supporremo avere un peso di 1 Kg/m^3 . Ne consegue che sarà necessario un volume di 100 m^3 .

Quesito - Che stati fisici può assumere l'acqua ?

Quesito - Cosa si intende per pressione parziale ?

Quesito - Cos'è l'umidità relativa ?

Quesito - Quali modi conosci per esprimere l'umidità dell'aria ?

Quesito - Cos'è l'igrometro ?

Quesito - Perché gli igrometri si è fatto uso di capelli ?

Quesito - Quali sono i principali tipi di masse d'aria ?

Quesito - Conosci un metodo per stimare il grado di nuvolosità ?

CAPITOLO 2

Flussi di energia e materia

In questa sezione si analizzano le dinamiche degli elementi descritti nel capitolo precedente in termini di flussi, fluttuazioni e bilanci.

L'aforisma *panta rei* ('tutto scorre'), attribuito a Eraclito, è sicuramente il più adeguato nell'introdurre le dinamiche della natura, in cui la prima cosa da prendere in considerazione è lo scorrere del *tempo* probabilmente la più potente delle forze della natura.

Buona parte della complessità dei sistemi che ci circondano è dovuta alla struttura e alle dinamiche che li regolano, e ciò che distingue la seconda dalla prima è proprio la presenza del tempo.

2.1. Dinamiche della radiazione solare

Quando nel primo capitolo si è presa in esame la radiazione solare, la si è caratterizzata come un fattore costante (la costante solare). In realtà essa varia a causa delle dinamiche delle reazioni termonucleari, che determinano continue fluttuazioni di intensità (c.ca 3‰).

Le macchie solari sono un fenomeno a lungo studiato che riguarda la formazione di zone scure sulla superficie del Sole, caratterizzate da un'attività particolarmente elevata. Caratterizzate da una dimostrata periodicità (la principale di circa 11 anni) ad esse sono state associate ripercussioni sul clima e sulle produzioni agrarie.

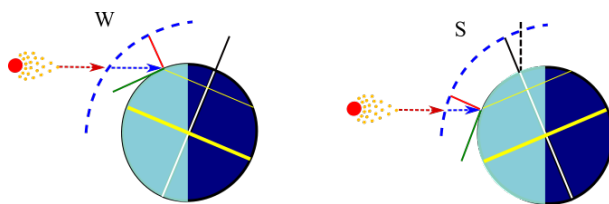
Le dinamiche della radiazione solare cui l'uomo e le piante sono più sensibili sono tuttavia quelle legate al moto di rivoluzione del pianeta Terra, ovvero quello lungo l'orbita ellittica attorno al sole e alla rotazione della Terra sul suo asse.

Il moto di rivoluzione determina il variare dell'intensità della radiazione al suolo *durante l'anno*, ovvero dalla stagione, ed è determinata da una combinazione della posizione della terra attorno al sole e l'angolo dell'asse terrestre con l'eclittica, il piano orbitale, di c.ca 23°.

L'inclinazione dell'asse terrestre - Il valore dell'inclinazione dipende dalla disposizione delle masse e può cambiare in dipendenza di grandi sismi. Nelle sue dinamiche sono anche stati evidenziati moti periodici con tempi geologici (decine di migliaia di anni) che lo porterebbero ad oscillare tra i 22° ed i 25°, con ripercussioni notevoli sul clima.

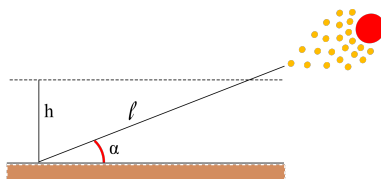
Tale inclinazione fa sì che nell'emisfero boreale (nord) i raggi solari in inverno colpiscono la superficie terrestre con un angolo (sull'orizzonte) inferiore rispetto all'estate.

Ciò porta gli stessi raggi a compiere all'interno dell'atmosfera un cammino ottico più lungo e conseguentemente a subire una maggiore attenuazione. In figura è evidenziato il percorso dei raggi solari nel raggiungere una località alle medie latitudini (c.ca 45°) nella stagione invernale (W) e in quella estiva (S).



L'importanza di tale attenuazione è assai maggiore della diversa vicinanza tra terra e sole nelle due stagioni estreme, tra l'altro inferiore in inverno. La misura dell'attenuazione è stimata, in condizioni di cielo sereno, dalla legge di Lambert-Beer, in cui la lunghezza del cammino ottico dei raggi solari, dipende dall'altezza del sole, ovvero l'angolo (α) che esso forma con l'orizzonte (dato da latitudine, giorno e ora). Per comprendere l'espressione può essere d'aiuto lo schema sottostante.

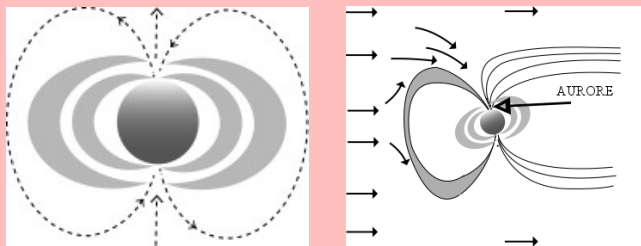
$$I = I_0 e^{-a/\sin\alpha}$$



in cui h è l'altezza dell'atmosfera, che considereremo costante, ed ℓ il cammino ottico.

Il coefficiente di estinzione - I processi associati all'estinzione della radiazione solare sono principalmente la **diffusione molecolare** da aerosol, dipendente dalla misura delle goccioline e l'**assorbimento**, da parte dei gas costituenti, del vapore e degli aerosol: CO_2 e CH_4 per l'elevata capacità di assorbire nell'IR sono anche associati al processo che porta al riscaldamento dell'atmosfera (effetto-serra) e perciò detti *gas-serra*.

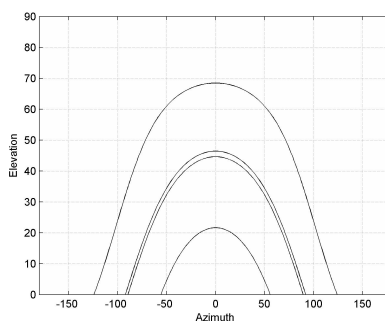
Le aurore polari - La terra ha un nucleo fluido con una forte componente metallica, la cui rotazione genera attorno al pianeta un campo magnetico in cui si possono distinguere due fasce (di van Allen) che hanno l'effetto di schermare le particelle cariche emesse dal sole, che sarebbero dannose per qualsiasi essere vivente. Poiché le fasce di van Allen sono allineate con l'asse terrestre, in determinate stagioni e condizioni possono veicolare il vento solare sui poli, vento che si manifesta attraverso fenomeni di luminescenza dovuti all'impatto delle particelle cariche con i gas atmosferici, note come aurore polari).



Il moto di rotazione attorno a questo asse determina l'angolo del sole sull'orizzonte, e quindi le dinamiche a scala giornaliera.

Per descrivere la posizione del sole si fa uso di un tipo di *coordinate astronomiche* dette *coordinate orizzontali* in cui si sceglie come piano di riferimento quello tangente alla terra nel punto in cui si trova l'osservatore. La posizione del sole è a questo punto definita dall'angolo rispetto all'orizzonte detto *elevazione* θ_s ($\theta_s = 0$ all'alba e al tramonto) e dall'angolo orario (h_s) dato dalla posizione del sole espressa in ore, rispetto a quella che assume allo zenith (verticale al piano di riferimento in corrispondenza dell'osservatore), approssimativamente intesa come il Sud o mezzogiorno.

Il diagramma solare rappresenta il grafico della traiettoria del sole ed è tipicamente rappresentato per alcuni giorni cardinali, quali equinozi e solstizi. Una volta individuata la posizione (Latitudine, Longitudine e altitudine) è possibile calcolare la posizione del sole ad una certa ora del giorno in termini di altezza (elevation) ed angolo orario (o azimuth) come rappresentato in figura in corrispondenza dei giorni di equinozio e solstizio.

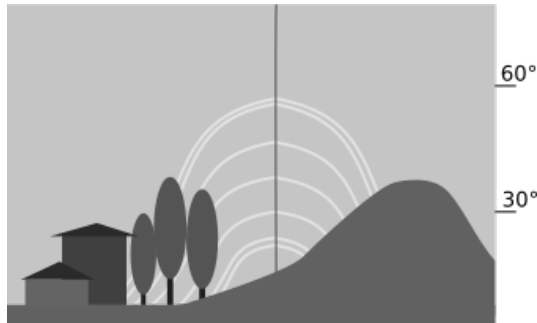


L'orizzonte rappresenta il limite inferiore di ciò che abbiamo chiamato cielo. L'orizzonte è dato da un luogo di punti espressi da due angoli, uno orizzontale, scelto a nostra convenienza (es. $^{\circ}Ncw$, ovvero gradi a partire da nord in senso orario) ed uno sulla verticale, solitamente riferito all'orizzonte ideale, essendo questo descritto dal piano tangente al globo terrestre (punto di visione).

Un aspetto da non trascurare dell'orizzonte è che esso è fortemente condizionato da ostacoli quali ad es. edifici.

L'ostacolo può infatti essere considerato una componente dell'orizzonte ma la differente distanza tra punto di osservazione ed ostacoli considerati può determinare rilevanti differenze anche a distanza di pochi metri.

In figura è riportato come, una volta costruita una carta solare di riferimento, sia possibile, riportarvi orizzonte ed ostacoli allo scopo di comprendere quale sia l'insolazione nei diversi momenti dell'anno.



2.2. La radiazione al suolo

Volendo ottenere l'ammontare della radiazione solare che giunge sulla superficie terrestre occorre considerare l'insieme dei processi che interessano la radiazione nell'attraversare l'atmosfera. Il bilancio atmosferico considera allo scopo riflessioni, assorbimenti, riemissioni e diffusioni e può essere scritto nella forma:

$$J_{dir} + D_{cloud} + D_{atm} + E_{cloud} + E_{atm} = J_{sun} - R_{cloud} - R_{atm} - A_{cloud} - A_{atm}$$

dove:

J - radiazione incidente, J_{dir} diretta e J_{sun} proveniente dal sole;

R - riflessione, R_{cloud} dalle nuvole e R_{atm} dall'atmosfera;

A - assorbimento, A_{cloud} delle nuvole e A_{atm} dell'atmosfera;

D - diffusione, D_{cloud} delle nuvole e D_{atm} dell'atmosfera;

E - ri-emissione, E_{cloud} delle nuvole e E_{atm} dell'atmosfera.

Pensando ad una qualunque superficie colpita dalla radiazione, il rapporto tra la frazione riflessa R e la radiazione totale incidente I prende il nome di **albedo**:

$$\rho = R / I$$

Per l'atmosfera, intesa come corpo visto dallo spazio, il valore dell'albedo vale circa $\rho_{atm} = 0.0685$. In presenza di copertura nuvolosa

una stima della radiazione riflessa da tali formazioni è riportata nella tabella sottostante.

Nube	Albedo	Nube	ρ
Cirri	0.83	Stratocumuli	0.34
Cirrostrati	0.80	Strati	0.25
Altostrati	0.50	Nembostrati	0.18
Altostrati	0.41	Nebbia	0.17

2.2.1. Bilancio energetico al suolo. La radiazione solare che raggiunge la superficie terrestre incide sui corpi presenti sulla superficie, ed è in parte riflessa e in parte assorbita. Nel bilancio al suolo è comune distinguere tra le varie tipologie di radiazione termica coinvolte. La radiazione solare è, infatti, per via dell'elevata temperatura del corpo che la genera, radiazione a onda corta (SW: Short-Wave) in quanto il picco radiativo si verifica ad una frequenza assai elevata.

Per contro la radiazione generata da corpi a bassa temperatura, quelli con cui siamo comunemente a contatto sulla terra, generano radiazione termica a bassa frequenza (Infrarosso Lontano, intervallo $4000nm - 1mm$) e quindi ad onda lunga (LW: Long-Wave). Il cielo è identificato come un corpo ad una temperatura determinata da una media di quella delle masse d'aria sovrastante (solitamente inferiore agli 0°).

Se indichiamo con delle frecce la direzione della radiazione, verso il basso (\downarrow) per la radiazione incidente e verso alto (\uparrow) per quella riflessa o emessa al suolo, possiamo ottenere un'espressione per la *Radiazione Netta*, data da bilanci separati di LW e SW:

$$R_{net} = R_{SW} \downarrow - R_{SW} \uparrow + R_{LW} \downarrow - R_{LW} \uparrow$$

La $R_{LW} \uparrow$ (radiazione a onda lunga diretta verso l'alto) è la radiazione termica della superficie.

I valori delle grandezze cambiano drasticamente tra notte e giorno: è facile pensare che di giorno il termine dominante è dato dall'irraggiamento solare, tuttavia la presenza di una copertura nuvolosa può determinare condizioni di intrappolamento dell'energia (presenza di afa) o di importanti schermature dei raggi solari (basse temperature).

Albedo Superficiali - Per le superfici esiste una complessità superiore rispetto a quella vista per gli albedo atmosferici, dovuta alla struttura fisica della superficie (rugosità) e alla presenza di una stratificazione (della vegetazione). Alcuni valori sono riportati nella tabella sotto.

<i>Superficie</i>	<i>Albedo</i>	<i>Superficie</i>	<i>Albedo</i>
<i>Neve fresca</i>	0.95 – 0.80	<i>Roccia</i>	0.25 – 0.15
<i>Superfici bagnate</i>	0,07	<i>Terreno sabbioso asciutto</i>	0.45 – 0.25
<i>Tappeto erboso irrigato</i>	0.37 – 0.14	<i>Terreno Argilloso asciutto</i>	0.35 – 0.20
<i>Tappeto erboso non irrigato</i>	0.25 – 0.15	<i>Terreno Torboso</i>	0.15 – 0.05
<i>Sabbia chiara</i>	0.45 – 0.25	<i>Terreno Coltivato</i>	0.14 – 0.07
<i>Sabbia grigia</i>	0.25 – 0.10	<i>Foresta</i>	0.20 – 0.06

Per quanto riguarda il terreno nudo può risultare di una certa importanza, oltre alla rugosità, anche il *colore*, che dipende sia dal materiale parentale che lo compone e del contenuto di sostanza organica, che dalle condizioni di umidità.

2.2.2. Il bilancio termico al suolo. La radiazione netta incidente determina un flusso di calore (Q_{net}) che a sua volta può essere:

- immagazzinato e quindi dar luogo ad un incremento di temperatura ($Q_{storage}$)
- trasmesso per conduzione in profondità ($Q_{conduzione}$)
- trasmesso per convezione all'aria sovrastante ($Q_{convezione}$)
- ceduto per evaporazione ($Q_{evaporazione}$)

per cui risulta:

$$Q_{net} = Q_{storage} + Q_{conduzione} + Q_{convezione} + Q_{evaporazione}$$

La determinazione di tali flussi può essere molto complessa: la superficie infatti può avere una struttura molto diversificata. Essa può essere semplicemente un confine netto di separazione con l'atmosfera come nel caso di una massa d'acqua o di un affioramento litologico, come pure una superficie vegetata con parti soleggiate e in ombra.

La temperatura del terreno è un aspetto che influisce in modo importante sull'ecosistema: tutti gli organismi viventi che esso ospita subiscono direttamente o indirettamente gli effetti della temperatura a cominciare dai microorganismi che esso ospita, presenti in quantità variabili nell'arco dell'anno soprattutto nello strato superficiale e che agiscono da interfaccia con le piante attraverso l'apparato radicale. Le piante risentono anche direttamente della temperatura del terreno sia nella germinazione che nel risveglio vegetativo.

$Q_{storage}$ - La capacità di un corpo di *immagazzinare calore* dipende dalla sua Capacità Termica che rappresenta il calore necessario ad innalzarne una certa massa di sostanza di un intervallo unitario di temperatura; per una quantità di massa unitaria di sostanza:

$$\Delta Q = c_p \cdot \Delta T$$

essa è identificata dal calore specifico c_p che per l'acqua vale $c_p = 1 \text{ cal/g}$; nel caso di materiali composti come il terreno il valore che esso assume dipende dalle componenti organo-minerali che lo compongono. In tabella sono riportati i valori di alcuni di essi.

materiale	$c_p \text{ (cal/g)}$
sabbia	0.18
argilla	0.17
materia organica	0.43

Si può notare come i minerali si registrano valori circa 5 volte inferiori a quelli dell'acqua liquida. Sostanzialmente più elevato è il calore specifico della sostanza organica, generalmente costituita in molta parte da acqua, che quindi incide in modo assai rilevante sulle dinamiche termiche della massa complessiva.

È del resto ben noto come un terreno umido abbia una forte inerzia al riscaldamento: un c_p complessivo doppio per un suolo rispetto ad un altro significa un tempo doppio perché la sua temperatura venga portata allo stesso valore attraverso uno stesso input termico.

Q_{conduzione} - All'interno del terreno il calore si propaga con modalità simili alla maggior parte dei solidi (legge di Fourier) e facilmente visibili negli andamenti delle temperature alle diverse profondità del terreno misurati in condizioni di normale irraggiamento (in cui in assenza di nuvolosità si registra tipicamente la minima di notte e la massima nelle prime ore del pomeriggio). Mentre in superficie l'andamento delle temperature è assai prossimo a quello dell'aria, in profondità è possibile osservare una graduale attenuazione delle oscillazioni termiche.

Q_{convezione} - L'attraversamento dei raggi solari non è di per sé sufficiente a determinare un riscaldamento di un gas come l'aria. Ciò che determina maggiormente il riscaldamento di un gas è infatti la presenza di una superficie che, una volta riscaldata dai raggi solari, determina successivamente un riscaldamento della massa gassosa sovrastante. La convezione è un processo che unisce trasporto di massa e di calore ed è pressoché sempre associato ad un rimescolamento (per altri dettagli vedi avanti).

Q_{evaporazione} - Quando la superficie è bagnata, la disponibilità di energia unitamente a condizioni atmosferiche favorevoli, può determinare l'evaporazione dell'acqua, passaggio che sottrae energia (vedi Calore Latente di Evaporazione) alla superficie determinandone un raffreddamento (vedi avanti).

Serre e sementai - L'attività metabolica delle piante dipende tanto dalla temperatura dell'aria quanto da quella del suolo. Questa è particolarmente importante per la germinazione dei semi. Per questo è comune l'uso dei cosiddetti **letti caldi** dati da cassette mantenute in luoghi protetti che assicurano che il calore accumulato di giorno attraverso l'insolazione non sia disperso durante la notte, in cui il suolo riemette radiazione raffreddandosi. La protezione è in questi casi semplicemente realizzata da coperture rimossi durante il giorno per evitare innalzamenti eccessivi delle temperature. Anche nelle serre la presenza di una copertura facilita un incameramento di energia prevenendo la riemissione e perdita per convezione (vedi sotto) attraverso la presenza di una chiusura semitrasparente (opaca all'IR). Tali meccanismi di cattura dell'energia solare sono usati nelle diverse tecnologie di generazione di energia alternativa classificate come 'solare termico'.

L'effetto serra - L'effetto serra è l'effetto che determina una temperatura mediamente elevata all'interno dell'atmosfera e soprattutto della troposfera, dovuto al fatto che il bilancio radiativo al suolo porta in media ad un intrappolamento di energia. Tale fenomeno è dovuto al comportamento selettivo che hanno gas (gas serra appunto) nei confronti della radiazione, lasciando passare la R_{SW} ed assorbendo la R_{LW} , gas quali CO_2 , CH_4 (metano), N_2O e la stessa acqua.

L'effetto serra è fondamentale alla vita in questo pianeta determinando temperature ospitali agli organismi viventi ed è quindi un fenomeno da vedere positivamente; ultimamente lo si vede come un fenomeno pericoloso in quanto recentemente con esso si suole intendere la deriva delle temperature medie che porta ad un Riscaldamento Globale (Global Warming).

2.2.3. Termodinamica dei gas. Le proprietà dei gas sono state a lungo studiate, portando a sviluppare relazioni indipendenti tra pressione (P) e volume (V), volume (V) e temperatura (T), volume (V) e massa (in termini di moli n). In particolare sono state individuate le relazioni fondamentali:

- L. di Boyle : $V \propto 1/P$
- L. di Charles : $V \propto T$
- L. di Gay-Lussac : $P \propto T$
- L. di Avogadro : $V \propto n$

In seguito si è dimostrato che le leggi potevano essere ricondotte ad una unica **legge generale dei gas**:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

dove R è la costante dei gas - $R = 8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$.

La legge stabilisce che **in un sistema chiuso** (senza scambio di materia, $n = \text{cost}$) le 3 grandezze elencate sopra non possono variare liberamente, in quanto una di esse è vincolata al valore delle altre due. Poiché nello studio dell'atmosfera si analizza un mezzo continuo non confinato, è preferibile esprimere la legge in funzione dell'unità di volume e l'espressione diventa;

$$P \cdot \alpha = R \cdot T$$

dove α il volume specifico riconducibile alla densità ρ dal peso molecolare M : $\alpha = V/n = m/\rho n = nM/\rho n = M/\rho$.

2.2.4. Il gradiente termico atmosferico. La legge dei gas ci dice come sono legate le 3 grandezze V , P e T , ma non come esse variano in corrispondenza di forzanti esterne, quelle che determinano le **trasformazioni termodinamiche** di una massa di gas. Se una "bolla d'aria atmosferica" viene spostata verticalmente si opera una trasformazione di **espansione** poiché la si sposta da un'altezza che si trova ad una pressione ad una che si trova a pressione inferiore. Il 1° principio della termodinamica (equivalenza calore - lavoro) ci dice che in seguito ad una espansione nel gas diminuisce la temperatura. Ne scaturisce una dipendenza diretta tra temperatura dell'aria e quota, nota come gradiente termico (Γ), che per l'aria secca vale:

$$\Gamma_d = \frac{\Delta T}{\Delta z} \approx -0.01^\circ\text{C}/\text{m} = -1^\circ/100\text{m}$$

Tale valore indica quanto ci dobbiamo aspettare che la temperatura cambi con l'altezza. Per l'aria umida il valore è inferiore, c.ca $-0.7^\circ/100\text{m}$.

2.3. Le dinamiche atmosferiche - la convezione

Una delle dinamiche più importanti dell'atmosfera è rappresentata dalla convezione, una tipologia di trasporto di calore associata al moto di fluido. L'atmosfera terrestre è in continuo movimento a causa degli squilibri generati dalla costante presenza di forzanti atmosferiche, che a piccola scala è sostanzialmente rappresentate dall'irraggiamento solare: l'atmosfera è un fluido in un enorme pentola il cui fondo se riscaldato in modo non uniforme e con una periodicità giornaliera. Tale riscaldamento fa sì che si generi un gradiente termico che tipicamente ha luogo in corrispondenza di una superficie: la massa d'aria a contatto di questa si riscalda dapprima per conduzione, quindi si espande per la legge generale dei gas vista sopra, quindi e prende a muoversi verso l'alto per galleggiamento. Poiché il galleggiamento è indotto dalla gravità la convezione naturale ha una componente principale verticale.

I termoconvettori - I termoconvettori sono sistemi utilizzati per il riscaldamento dei locali attraverso l'attivazione di una convezione naturale. L'aria in prossimità della superficie calda si espande e prende a salire per galleggiamento, lasciando che aria fredda prenda il suo posto, ed attivando quindi flussi di ricircolo che portano ad un rimescolamento dell'aria calda con quella più fredda. Quando all'interno del convettore sono presenti sistemi elettromeccanici quali ventilatori o turbine si parla di **convezione forzata** in quando il movimento non è indotto esclusivamente dal gradiente termico naturale alla superficie.

Effetto camino - Convezione è quello che succede nella combustione: fumi ed aria calda in genere risalgono per una minor densità (L.di Archimede) dovuta ad una temperatura maggiore rispetto all'aria circostante. Il meccanismo è lo stesso delle di raffreddamento che usano nei paesi caldi per smaltire aria calda verso l'alto richiamandone di fresca da altri ambienti. In entrambi casi l'ascesa è veicolata sulla direttrice volute con l'aiuto di strutture apposite (la canna fumaria) il cui *tiraggio* è spesso determinato anche dalla presenza di una *pressione dinamica* esercitata da un movimento d'aria alla quota di fuoriuscita.

Mogolfiere - Anche nel volo aerostatico (mongolfiere) si usa la tecnica del riscaldamento di una massa d'aria, questa volta intrappolata in un pallone aperto solo nella parte basale dove una fiamma mantiene la massa d'aria interna riscaldata (un'apertura sommitale comandata permette la discesa dell'aeromobile).

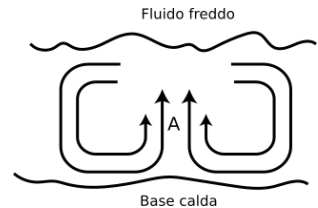
Galleggiamento e ristagno - In realtà moti ascensionali di gas non sono sempre associati ad un riscaldamento. Nell'aria si possono generare bolle d'aria con una composizione diversa e quindi con miscibilità limitata, come nel caso di emissioni o perdite gassose, bolle a densità inferiore o superiore: nel primo caso avremo dinamiche simili a quelle della convezione ma senza trasferimento di calore, nel secondo invece il gas più pesante tenderà a cadere verso il basso determinando un 'lago' invisibile.

Fondamentale per comprendere la dinamica dei fluidi è la **legge di continuità** che ci dice che, quando una porzione di un fluido si sposta, deve essere sostituita da un'altra porzione - non può rimanere un 'vuoto': quando immettiamo aria in un ambiente il miscelamento è graduale mentre ciò che avviene in prima battuta è una sostituzione di aria presente con aria da nuove caratteristiche: tale rimpiazzo è percepito con un certo ritardo poiché i gas leggeri vanno sul soffitto, quelli pesanti sul pavimento.

Gas nocivi e condizionamento - Nei luoghi abitati la legge impone la necessità di aerazione, praticata attraverso fori sia in prossimità del pavimento che del soffitto. Tali fori sono orientati rispettivamente a smaltire fughe di GPL e gas metano (CH_4), il primo più pesante dell'aria, il secondo più leggero. L'ossido di carbonio (CO) che si sviluppa in condizioni di combustione imperfetta ed estremamente pericoloso per l'uomo è più pesante dell'aria. Tali fori generano sfortunatamente anche perdite di calore (fori alti) o di aria fredda (dai condizionatori) che tende a ristagnare sul pavimento.

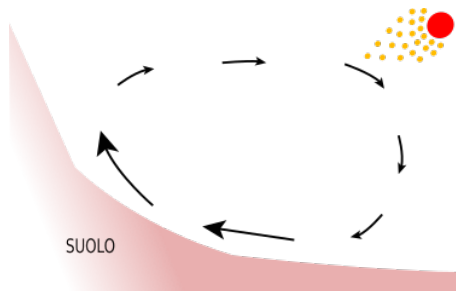
Mentre nella **convezione forzata** la presenza di una ventilazione forzata assicura il flusso convettivo, nella **convezione naturale** l'accensione dipende unicamente dal differenziale termico e può avere intensità molto diverse: questo rende la convezione un processo particolarmente complesso da studiare, simulare e prevedere.

Convezione a celle - Vi sono tuttavia condizioni rare (di densità, viscosità, gradiente termico) in cui la convezione può avvenire in modo particolarmente ordinato, in regime laminare: il fenomeno, che prende il nome di convezione di Railegh-Bénard, determina celle di circolazione chiuse, come schematizzato in figura.



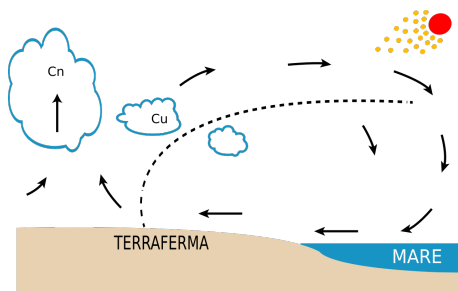
2.3.1. Le brezze. Il termine brezza, utilizzato nel linguaggio comune per indicare un vento di bassa intensità, identifica una particolare **dinamica circolatoria** che si può venire a verificare in siti con una particolare **predisposizione geomorfologica** e che prevede l'instaurarsi di un regime convettivo di media scala (1-100km) al verificarsi determinate **condizioni al suolo e in quota**.

La **brezza di valle** si verifica in corrispondenza di versanti irraggiati dal sole. Di giorno il suolo si riscalda e la pendenza favorisce uno slittamento dello strato d'aria calda in quota, dove l'aria incontra uno strato di inversione, mentre a valle è richiamata aria dall'alto permettendo di chiudere la cella su se stessa, come rappresentato in figura.



La **brezza di mare** si verifica invece in corrispondenza delle coste (sia marine che lacustri), in cui la forzante è determinata dalla differenza di temperatura tra superficie marina ed entroterra. In presenza di soleggiamento la terraferma, con una capacità termica inferiore del mare, si riscalda più rapidamente inducendo moti d'aria ascensionale che richiamano aria fresca dal mare: il motore della brezza è il differenziale termico tra le due superfici.

I moti ascensionali sulla terraferma giungono a quote a cui a loro volta vengono richiamati dalle masse che invece discendono sul mare, chiudendo la cella convettiva. Poiché l'aria di mare è ricca di umidità i moti ascensionali sulla terraferma portano in quota aria ricca di vapore che una volta in quota si condensa dando luogo a nuvolosità (cumuli del bel tempo).



Il regime di brezza ha solitamente **due configurazioni**: a quella **diurna**, il cui meccanismo è stato appena descritto, va ad aggiungersi quella **notturna** dove le 'polarità' termiche si invertono: la terraferma così come era la prima a scaldarsi di giorno è anche la prima a raffreddarsi di notte. Alle configurazioni notturne sono dati rispettivamente i nomi di **brezza di monte** e **brezza di terra**.

Il regime di brezza possiede una dinamica che prevede una **accensione** del fenomeno, determinata dal verificarsi di un irraggiamento sufficientemente intenso, un **potenziamento**, associato ad un allungamento dell'area interessata al fenomeno e ad un aumento dell'intensità del vento ed infine uno **spegnimento**, al tramontare del sole (allo spegnersi della forzante che la tiene in vita).

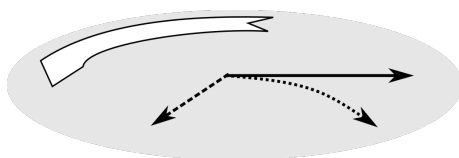
Perché si verifichi l'accensione, oltre alle condizioni di insolazione, sono necessarie condizioni appropriate in quota: temperature e valori di umidità troppo elevati ne impediscono la realizzazione, mentre correnti fresche possono aiutarne il potenziamento.

In Italia esistono molte situazioni in cui esistono le due condizioni geomorfologiche descritte, con una combinazione della brezza di valle e di quella di mare (es. costa Adriatica dalla bassa Romagna al Gargano)

aumentando così sia la probabilità di accensione (nei periodi di elevata insolazione, dalla primavera all'autunno) che l'intensità e la profondità che le caratterizza.

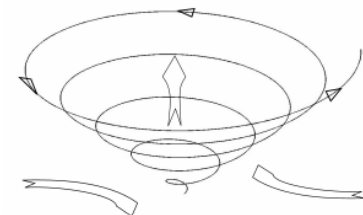
2.4. Le dinamiche atmosferiche - la rotazione terrestre

Quando le dinamiche atmosferiche cominciano ad interessare una scala delle decine di km, comincia a farsi notare la presenza di un'altra forzante, il moto di rotazione terrestre. Quando un corpo, nel nostro caso una massa d'aria, si sposta radialmente in un sistema in rotazione (la terra) esso subisce uno spostamento tangenziale dovuto ad una forza (apparente) di intensità determinata dalla **legge di Coriolis**, che tende a farla deviare a destra o sinistra a seconda del verso di rotazione.



Tali deviazioni partano circolazioni diverse a seconda se il flusso della massa d'aria è ascensionale o di subsidenza, e a seconda che ci si trovi nell'emisfero boreale o quello australe.

Nell'emisfero boreale a flussi ascensionali corrisponde una circolazione ciclonica con rotazione antioraria: in figura le frecce sulla spirale indicano l'effetto di trascinamento visibile sulle nubi in quota; viceversa alla subsidenza (moto discendente) corrisponde una circolazione anticiclonica con rotazione oraria. Nell'emisfero australe i sensi di rotazione si invertono.



La parola ciclonica deriva dall'instaurazione di movimenti di rotazione (ciclo) a spirale al cui centro ci sono forti correnti ascensionali: tale condizione si verifica in presenza di aria calda ed umida che a mano a mano che giunge in alto raffredda dando luogo ad un'intensa nuvolosità, che viene a mancare in una ristretta porzione centrale detta occhio del ciclone.

I cicloni tropicali prendono il nome di **uragani** (hurricane, nell'Atlantico) e **tifoni** (nel Pacifico) a seconda se si originano nell'atlantico o nel pacifico, sono quelli collegati ai flussi più intensi del pianeta e possono raggiungere migliaia di km di diametro con velocità del vento al suolo fino a 500 km/h . I cicloni **extra-tropicali** hanno una dimensione più ridotta e di solito si manifestano come temporali di media intensità.

Non è raro di recente il verificarsi di fenomeni di elevata intensità anche alle medie latitudini: a tali cicloni è stato dato il nome di TLC (Tropical-like cyclones e Medicanes). La scala Fujita identifica 5 livelli di intensità basandosi sulla velocità del vento e la larghezza della 'striscia' di danni che lascia il ciclone al suo passaggio.

Trombe d'aria - Sul mare e nelle distese pianeggianti si possono verificare trombe d'aria e turbini che sollevano acqua, polveri ed oggetti anche di congrue dimensioni: sul mare sono le trombe marine, nelle distese americane prendono il nome di tornado. Turbini di polvere (en:dust devil) si possono realizzare anche in assenza di vere e proprie perturbazioni. A fianco un tornado ([26])



L'anticiclone è associato a moti d'aria discendenti che caratterizzano l'alta pressione, contraddistinta da aria secca; il moto circolatorio è opposto al precedente e non è immediatamente visibile nelle immagini satellitari.

Cicloni ed anticicloni possono essere visti come ingranaggi di un immenso orologio che occupano la gran parte dei due emisferi, separati dalla fascia monsonica. Ad ingranaggi che ruotano in un senso se ne alternano altri che girano in senso opposto con marcate alternanze stagionali dovute alla variazione dell'esposizione alla radiazione solare.

Anche alla circolazione di brezza sono associate dinamiche circolatorie di tipo depressionario che possono portare a perturbazioni anche di natura temporalesca: i cumuli del bel tempo tendono infatti ad accumularsi dando luogo a cumulonembi che alimentano le precipitazioni nei tipici temporali estivi (pomeridiani).

2.4.1. La convezione a scala planetaria. L'irraggiamento solare si fa sentire anche alla scala planetaria, producendo un riscaldamento sulla fascia del pianeta più esposta, quella in prossimità dell'Equatore, determinando alcune delle più importanti dinamiche atmosferiche di grande scala.

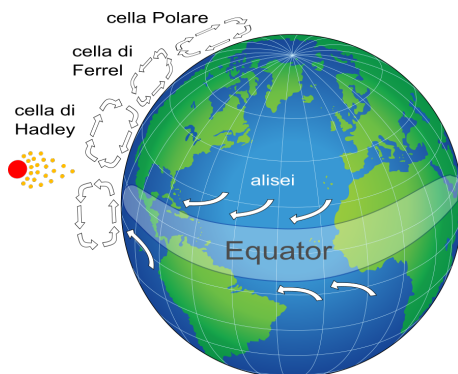
Questo intenso irraggiamento attiva le più ampie e potenti celle convettive del pianeta, le celle di Hadley, una a nord ed una a sud dell'equatore, dove si realizza una **zona di convergenza intertropicale (ITCZ)** e caratterizzate dall'assenza di venti e una zona di bassa pressione.

Alle latitudini più elevate si realizzano invece condizioni di alta pressione e le direzioni si invertono: queste latitudini sono contraddistinte dalle grandi zone desertiche subtropicali.

Le **celle di Hadley** si combinano a sistemi più complessi presenti alle medie latitudini, rappresentati dalle celle di Ferrel e da quella Polare (vedi figura).

Abbinato al moto di circolazione planetario, in prossimità dei tropici ai moti convettivi si associano potenti e costanti venti al suolo, gli **alisei**, su cui si è basata la navigazione nautica per centinaia di anni, tant'è che i venti sono anche detti venti del commercio e spirano sempre da est.

A causa della diversa esposizione che il pianeta offre al sole, tali condizioni si spostano nelle stagioni tra due latitudini note come tropici, quello del Cancro a Nord dell'Equatore, e quello del Capricorno a Sud, entrambi ad una latitudine pari all'inclinazione dell'asse di rotazione terrestre ($23^{\circ}27'$). Nel periodo estivo nell'emisfero Boreale sono irraggiate maggiormente le zone del Tropico del Cancro, mentre nell'estate Australe, ciò avviene per Tropico del Capricorno.



Schema delle principali dinamiche atmosferiche terrestri

La conseguenza è che le celle di Hadley si spostano a nord nel primo caso e a sud nel secondo.

Tale 'ricollocazione' porta (nei passaggi di stagione) allo sviluppo di venti di particolare intensità denominati **monsoni** in oriente, e che portano ai cicloni tropicali discussi in precedenza.

Come al suolo anche ad alta quota (c.ca 10km) si originano correnti importanti che prendono il nome di 'corretti a getto' (en: jet stream), sfruttate nella navigazione aerea d'alta quota.

2.4.2. Il vento. Il vento è un movimento di masse d'aria in cui è possibile individuare una componente dominante connotata da una **provenienza** ed una **intensità**.

I venti sono normalmente assunti paralleli al suolo e dovuti al movimento delle masse d'aria può avvenire a diverse scale.

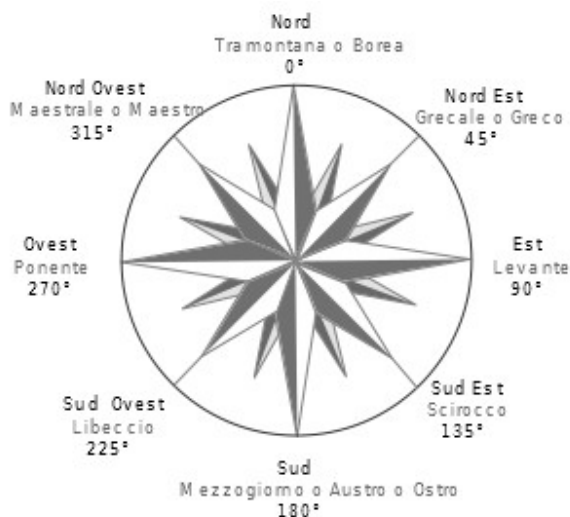
A scala regionale la geomorfologia facilita l'insediamento di condizioni cicloniche o anticicloniche con carattere stagionale che fa sì che siano tipici venti da direzioni caratteristiche e con denominazioni locali.

Vento e navigazione - Il vento è alla base di molte attività umane. Mentre oggi la navigazione a vela è in gran parte praticata a scopo sportivo, vi era un tempo in cui era alla base del commercio. La conoscenza dei venti e della loro stagionalità era fondamentale per affrontare e per pianificare un viaggio in assenza di altre tipologie di propulsione.

La **forza del vento** - Sebbene l'intensità dei venti al suolo sia solitamente ridotta, tutte le strutture artificiali esposte vanno progettate in funzione delle intensità maggiori: ai tropici in corrispondenza dei cicloni il vento può raggiungere anche velocità di 400km/h.

La **portanza**, fenomeno che si verifica su superfici con determinata forma generando depressioni che portano ad un sollevamento delle superfici, alla base del volo (con ali) e della navigazione a vela (andature di bolina), può verificarsi anche su teli e reti e altre superfici compromettendone la stabilità. I venti sono particolarmente importanti per le tipologie di volo non assistito da motori, quali le mongolfiere, in cui la stima delle correnti è fondamentale per la pianificazione di un viaggio. Per i volo-velisti la **componente verticale** del vento presente nei regimi convettivi è nota come **termica**. I grandi rapaci quali aquile, avvoltoi e falchi ne fanno uso da sempre.

Nel mare Mediterraneo i nomi sono anche comunemente riportati nella **rosa dei venti** riportata sotto.



2.4.3. Turbolenza. La variabilità di un vento può interessare l'intensità, contraddistinta dalla presenza di **raffiche**, o dalla direzione, nel cui caso si parla di turbolenza.

La turbolenza è uno dei processi più complessi della fluidodinamica, difficile da studiare da controllare. La turbolenza indica la presenza nel moto di un fluido di una componente senza una determinata direzione associata ad una dissipazione dell'energia della massa di fluido.

In precedenza, parlando di gradiente termico atmosferico, si è stabilito quale dovesse essere l'andamento delle temperature con l'altezza. Uno sbilanciamento di tale gradiente determina l'innescio di moti ascensionali o di subsidenza. In riferimento a ciò diremo che una particella d'aria è stabile quando, ipotizzando di spostarla verticalmente essa tende a tornare nella posizione originale, neutra se è indifferente allo spostamento, instabile se tende ad allontanarsi ulteriormente dalla posizione iniziale. Tale concetto definisce la cosiddetta **stabilità statica**. Si parla invece di stabilità dinamica in riferimento un moto di un fluido che si muove in prossimità di una superficie: il moto si dice in **règime laminare**, quando i filetti fluidi si mantengono paralleli tra di loro, **turbolento** se invece ha luogo un rimescolamento caotico. L'uso di specifici parametri (es il numero di Reynolds) permette di identificare il punto di transizione tra un règime ed un'altro ed il grado di turbolenza, o nel caso dell'atmosfera del grado di stabilità.

L'atmosfera può essere caratterizzata da una stratificazione, ognuna con un diverso grado di stabilità: lo strato più prossimo al suolo è detto Strato Limite Atmosferico (PBL, Planetary Boundary Layer) ed ha uno spessore che può variare dai 100 ai 3000m in dipendenza della tipologia di superficie e di condizione meteorologica.

Il profilo della velocità del vento - Le condizioni di turbolenza del PBL dipendono dalla rugosità della superficie, e determinano l'andamento dell'intensità del vento con l'altezza $u(z)$, solitamente rappresentata da un profilo logaritmico:

$$u(z) = (u^*/k) \cdot \ln(z/z_0)$$

dove k è una costante (di von Karman, per l'atmosfera vale $0.35 - 0.40$), u^* è l'intensità del vento al suolo e z_0 è il coefficiente di la rugosità, con i valori che vanno da **0.001** per il ghiaccio a più di **100** per un'area edificata.

La turbolenza è la componente non laminare del flusso, ovvero quella parte che determina rimescolamento dei filetti fluidi. Essa è alla base delle formazioni nuvolose, che si verificano alla superficie di incontro di due masse d'aria, es. una fredda e secca ed una calda e umida.

La misura del vento - La misura del vento in un punto è correntemente effettuata attraverso una coppia di strumenti, la banderuola, che individua la direzione di provenienza, e l'anemometro a coppe rotanti, la cui intensità di rotazione determina la velocità della componente del vento parallela al suolo.

Tali strumenti non sono disegnati per l'osservazione della componente verticale, così come non permettono di valutare le variazioni di direzione ed intensità più rapide. Allo scopo esistono strumenti specifici quali l'anemometro sonico.



Apparato per la misura dell'intensità e la direzione del vento

2.5. Esercizi

Quesito - L'intensità della radiazione solare è costante nel tempo ?

Quesito - Cos'è l'eclittica ?

Quesito - Quanto vale l'angolo dell'asse di rotazione terrestre rispetto alla perpendicolare all'eclittica ?

Quesito - Come incidono le stagioni sulla radiazione al suolo ?

Quesito - Come cambia la configurazione del pianeta Terra rispetto al Sole durante l'anno ?

Quesito - Cos'è la legge di Lambert-Beer ?

Quesito - Cos'è il coefficiente di estinzione ?

Quesito - Cos'è l'orizzonte ?

Quesito - Cosa determina l'orizzonte reale ?

Quesito - Sapresti esprimere con un'espressione la quantità di radiazione che giunge al suolo ?

Quesito - Cosa determina l'assorbimento della radiazione solare nell'atmosfera ?

Quesito - Cosa si intende per albedo ?

Quesito - Quali valori può assumere l'albedo ?

Quesito - Sapresti indicare un valore approssimato dell'albedo per alcune superfici ?

Esercizio - Disegnare un orizzonte di un luogo a piacimento e sovrapporvi un diagramma solare.

Quesito - A che latitudine ci troviamo ?

Quesito - Al solstizio d'estate quanto vale l'inclinazione del sole ?

Esercizio - Nella legge di Lambert-Beer l'intensità della radiazione solare al suolo dipende dalla lunghezza del percorso. Qual'è il rapporto tra quello due solstizi alla latitudine di 45° a mezzogiorno ?

Suggerimento - Disegnare le configurazioni di incidenza dei raggi solari per i due solstizi derivando angoli di incidenza e lunghezza del cammino ottico dei raggi solari nell'atmosfera.

Soluzione - Nell'equazione di Lambert-Beer la lunghezza del percorso (L) è proporzionale a: $L \propto 1/\sin\alpha$. Date le due altezze (angoli) $\alpha_{inverno} \simeq 45 - 23 = 22$ e $\alpha_{estate} \simeq 45 + 23 = 68$, se ne deriva che le due lunghezze sono proporzionali a $L_{estate} \propto 1/\sin(22)$ ed $L_{inverno} \propto 1/\sin(68)$ per cui il rapporto dei due cammini ottici vale: $2.67/1.04 \simeq 2.6$.

Quesito - Perché il cielo è blu ?

Quesito - In cosa si differenziano la radiazione solare extraterrestre da quella al suolo ?

Esercizio - Calcoliamo lo spessore ipotetico dell'atmosfera ipotizzata omogenea se l'irraggiamento a terra è di $500W$ ed assumendo un fattore di attenuazione di $0.1km^{-1}$?

Soluzione - Invertiamo l'equazione di L-B:

$$\ln(I/I_0) = -a \cdot z \Rightarrow z = -\ln(I/I_0)/a$$

quindi sostituiamo i valori (compreso quello della costante solare) ottenendo:

$$z = -\ln(I/I_0)/a = -\ln(500/1370)/a = -1/-0.1 = 10km$$

Quesito - Che componenti possiamo distinguere nella radiazione che giunge sulla superficie terrestre ?

Quesito - Perché nel bilancio radiativo al suolo distinguiamo radiazione ad onda lunga e ad onda corta ?

Quesito - Quali flussi di calore determina la radiazione che giunge al suolo ?

Quesito - Esprimere in formula il bilancio radiativo al suolo, indicando il significato dei simboli utilizzati.

Quesito - Qual'è la differenza tra un gas e un liquido ?

Quesito - Che grandezze intervengono nella Legge Generale dei Gas ?

Quesito - Quali grandezze di base caratterizzano una massa gassosa ?

Quesito - Come si esprime la legge generale dei gas ?

Quesito - Cos'è il gradiente termico adiabatico ?

Esercizio - L'atmosfera è una massa gassosa. Qual'è la sua composizione ?

Soluzione - Le componenti principali sono Azoto N_2 e Ossigeno O_2 presenti nelle percentuali approssimate del 78% e del 21%.

Quesito - Cos'è la pressione atmosferica ? Quali Unità di Misura ha ? Come la si misura ?

Esercizio - Qual'è il volume occupato da una mole d'aria in condizioni Standard ($1Atm = 1013hPa, 0^\circ C$) ?

Soluzione - Utilizzando l'espressione di base $V = \frac{n \cdot R \cdot T}{P}$ andiamo a risolvere per $n=1$:

$$V = \frac{1 \text{ mol} \cdot 8.31 \text{ J/mol} \cdot 273 \text{ K}}{1013 \text{ hPa}} = 22.4 \text{ L}$$

Esercizio - Qual'è la densità dell'aria in condizioni Standard ?

Soluzione - Dapprima ricavo il peso di una mole d'aria come media pesata tra quello dell' N_2 e dell' O_2 :

$$M_a = \frac{21 \cdot 36 + 78 \cdot 28}{99} \simeq 29 \text{ g}$$

quindi ricavo il rapporto:

$$\rho_a = \frac{29 \text{ g}}{22.4 \text{ L}} \simeq 1.3 \text{ g/L}$$

Quesito - Quali sono le principali tipologie di nubi ?

Quesito - Quanto vale il gradiente termico adiabatico ? usa le unità di misura appropriate.

Esercizio - Se al mare misuro una temperatura di 40°C che temperatura mi aspetto di avere in una località non lontana ma all'altitudine di 1000 m ?

Soluzione - Se ipotizziamo che l'aria abbia un basso contenuto di umidità, e quindi adottando un 'lapse rate' pari a quello dell'aria secca, ottengo:

$$T_{\text{montagna}} = T_{\text{mare}} - \Delta z \cdot \Gamma_d = 40^\circ - 1000 \cdot 0.01^\circ\text{C}/\text{m} = 40^\circ - 10^\circ = 30^\circ$$

Quesito - Che relazione esiste tra convezione e galleggiamento ?

Quesito - Cosa si intende per brezza ?

Quesito - Cosa si intende per cella di brezza ?

Quesito - Quali condizioni sono necessarie all'accensione e allo sviluppo di una brezza ?

Quesito - Quali sono le configurazioni di una brezza?

Quesito - Quali sono i fattori geomorfologici che contribuiscono alla formazione della brezza ?

Quesito - Cos'è la legge di Coriolis ?

Quesito - Cosa significa circolazione ciclonica ?

Quesito - A quale movimento verticale di massa d'aria è associato il moto ciclonico?

Quesito - A quale movimento verticale di massa d'aria è associato il moto anti-ciclonico?

Quesito - A quale dinamica è associata una cellula di bassa pressione ?

Quesito - A quale dinamica è associata una cellula di alta pressione ?

Quesito - Cosa si intende con celladi Hadley ?

Quesito - Cosa sono gli alisei ?

Quesito - Cosa sono i monsoni ?

Quesito - Cosa chiamiamo vento ?

Quesito - Conosci alcuni nomi di vento ?

Quesito - Come si misura il vento ?

Quesito - Quali componenti del vento si misurano abitualmente ?

Quesito - Cosa si intende per turbolenza ?

Quesito - Cos'è la stabilità atmosferica ?

Trasformazioni

Tra tutte le trasformazioni della materia che avvengono nel pianeta, nulla è probabilmente più importante di quelle cui va soggetta l'acqua che spesso fa da tramite alla radiazione solare nell'attivazione e mantenimento di molti processi susseguendosi in un ciclo che permea ogni cosa.

3.1. Evaporazione e condensazione

L'evaporazione è quel processo attraverso cui una sostanza passa dallo stato liquido a quello gassoso, che nel caso dell'acqua è rappresentata dal vapor d'acqua¹; l'evaporazione avviene a temperatura costante e richiede una notevole quantità di energia, il **calore latente di evaporazione**, che nel caso dell'acqua è pari a $\lambda_e \simeq 540 \text{ cal/g} = 2450 \text{ J/g}$ ². Confrontando tale valore al Calore Sensibile, che nel caso dell'acqua vale $c_p = 1 \text{ cal/g}$ notiamo immediatamente che il calore latente equivale al calore necessario ad innalzare di 1°C ben 540g d'acqua liquida.

Il vapore (d'ora in avanti intendiamo v. d'acqua), diversamente dagli altri gas presenti nell'aria, raggiunge molto presto una **concentrazione di saturazione**, condensandosi.

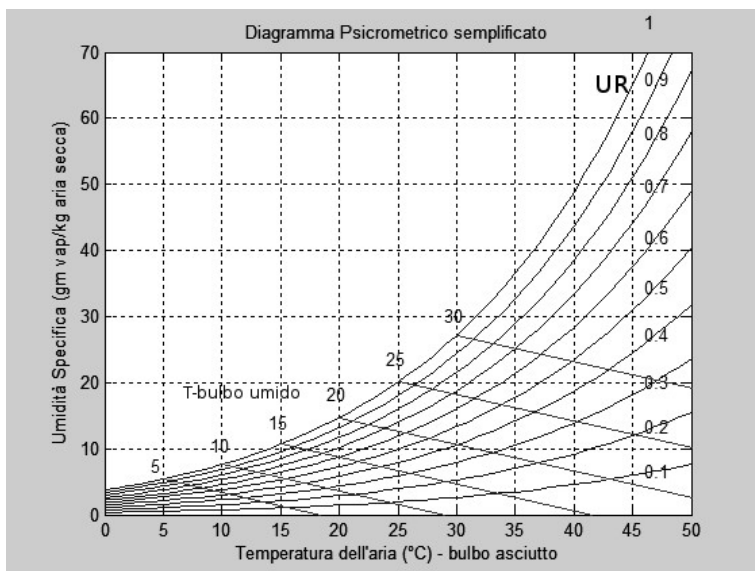
Il diagramma psicrometrico riporta la relazione esistente tra concentrazione di vapore (umidità specifica nella figura sotto) e temperatura.

Nel diagramma si può osservare come per una determinata **umidità specifica** (asse delle ordinate) al variare della temperatura corrispondano valori diversi di **umidità relativa** (riportati in corrispondenza delle curve).

Riducendo la temperatura si traggono valori di UR sempre più bassi fino a raggiungere ad una curva critica ($UR = 100$) cui corrisponde la **temperatura di rugiada**, quella a cui il vapore raggiunge la saturazione.

¹il nome vapore è usato per qualunque sostanza allo stato gassoso in presenza della fase liquida

² $1 \text{ kcal} = 4186 \text{ J}$



Se abbassassimo la temperatura il vapore d'acqua condenserebbe fuoriuscendo dal sistema atmosfera fino a quando la concentrazione di vapore non si porta alla massima consentita alla nuova temperatura. Tale fuoriuscita sarebbe evidente dalla comparsa di nebbia o condensa sulle superfici più fredde.

Il condizionamento - Molti ambienti (lavorativi, residenziali, nei mezzi di trasporto) hanno ambienti climatizzati. I climatizzatori o condizionatori aspirano aria dall'ambiente per poi restituirla dopo averne modificato le caratteristiche. Ciò avviene spingendo l'aria su una superficie fredda in cui si verifica una condensazione e quindi una deumidificazione.

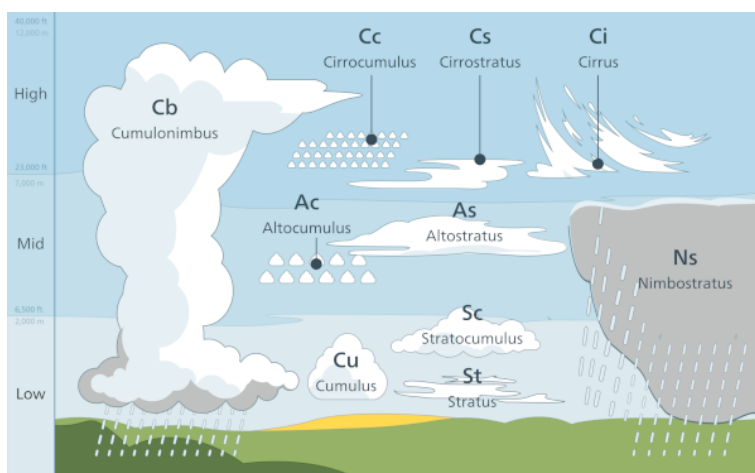
Il **bulbo umido** è un sistema sulla cui superficie è presente acqua liquida in equilibrio con il suo vapore saturo. Tale sistema è adottato in apparati di misura, detti **psicrometri**, per misurare l'umidità dell'aria. Uno psicrometro classico è costituito da due termometri identici, in uno dei quali il bulbo è mantenuto costantemente umidificato e ventilato allo scopo di far coesistere la fase liquida e quella vapore di modo che si ponga alla temperatura di 'rugiada' dell'aria. Dalla contemporanea misura (col termometro a bulbo asciutto) della temperatura dell'aria possiamo quindi dedurre l'UR.

3.1.1. Condensazioni in natura. Quando immettiamo vapore nell'atmosfera (es. mettendo a bollire dell'acqua) il vapore che si genera risale mescolandosi ad aria più fredda. In tali condizioni essa facilmente raggiunge la saturazione condensandosi in goccioline finissime. Il

fenomeno si verifica anche quando alitiamo in un ambiente freddo o aprendo una ghiacciaia o nelle scie turbolente dei jet di linea.

Il fenomeno che stiamo osservando è la **condensazione per miscelazione** che si verifica quando due masse d'aria con diverse caratteristiche si miscelano, una calda e umida, ed una più fredda; il rimescolamento produce un abbassamento della temperatura della massa complessiva ed una ridistribuzione dell'umidità. Anche se la massa d'aria fredda è secca, cioè con un basso contenuto di vapore, l'abbassamento di temperatura porta le bolle d'aria umida facilmente al punto di rugiada, con formazione di microscopiche goccioline in sospensione, le nuvole. Se la temperatura della massa d'aria fredda è inferiore agli 0°C il vapore può passare direttamente allo stato di ghiaccio, come si verifica nelle nubi d'alta quota (es. cirri).

La **nefologia** si occupa dello studio della dinamica della formazione delle masse nuvolose mentre la meteorologia ne ha definito una *nomenclatura*, riportata in tabella e visualizzate nella figura (da[5]).



Condensazione sulle superfici. Ciò può succedere anche in prossimità di una superficie, in cui condensazione o sublimazione possono determinare gocce di **rugiada** o cristalli di **brina** (en:hoar).

Il ghiaccio è caratterizzato da una ulteriore proprietà alla base di molti processi legati alla geodinamica e alla vita sulla Terra: come la maggior parte delle sostanze, una volta allo stato solido continua a contrarsi al diminuire della temperatura ma esiste una temperatura (-4°C) al di sotto della quale l'acqua riprende ad aumentare di volume. È questo fenomeno che ne conferisce la capacità dirompente che gli permette

Quota		nome	descrizione
	Cu	Cumuli	nubi individuali a sviluppo verticale e base piana cupoliformi e fioriformi
Bassa quota 0 – 2000m	St	strati	nubi basse uniformi
	Sc	Stratocumuli	nubi in banchi con aspetto di acciottolato
	Cb	Cumulonembi	nubi a notevole sviluppo verticale (fino a 10km) temporalesche
	Ac	Altocumuli	globulari, a rotoli o lamelle in banchi o strati
Media Quota 2000 – 6000m	As	Altostrati	distesa uniforme talvolta semitrasparente
	Ns	Nembostrati	nubi nere amorfe accompagnate da sfrangiature basse
	Ci	Cirri	a ricciolo, fibrose e striate
Alta quota > 2000m	Cc	Cirrocumuli	distesa di nubi granulari (a pecorelle)
	Cs	Cirrostrati	velo biancastro semitrasparente e con alone

di fratturare anche le rocce più dure. Una volta che l’acqua sia penetrata in una fessura, o che si trova all’interno dei tessuti forti abbassamenti termici possono provocare danni ingenti al sistema che la ospita.

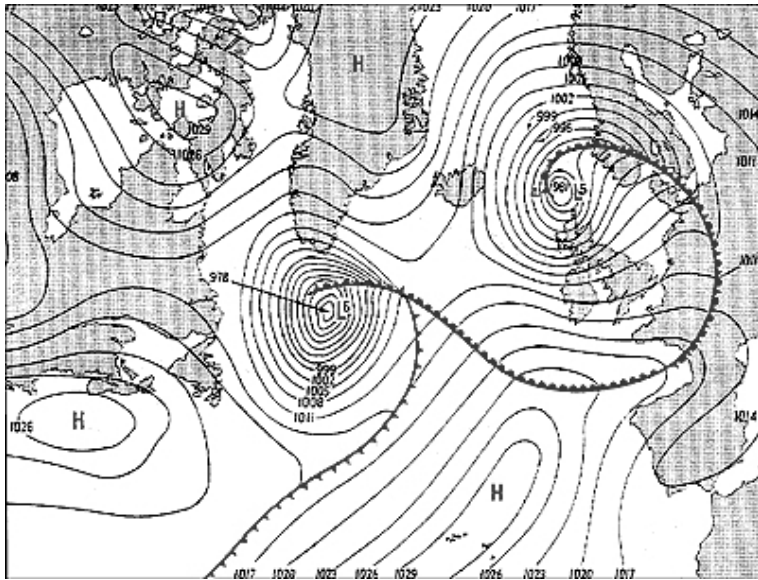
La galaverna (en:hoarfrost) è uno dei fenomeni più spettacolari della natura ed è associato ad una brinata spinta che avviene quando sia la superficie di condensazione che l’aria circostante sono inferiori agli 0°C. Tali condizioni fanno sì che il cristallo di ghiaccio, dopo essersi formato continua ad accrescersi (immagini da [13])



3.2. La Meteorologia

La meteorologia è la scienza che si occupa dell’osservazione dei fenomeni atmosferici (meteore) e della descrizione dello stato dell’atmosfera (che tempo fa).

Uno degli obiettivi della meteorologia classica è la previsione del tempo meteorologico, per la quale è fondamentale l’osservazione (al suolo e in quota) e successivamente l’analisi sinottica ovvero d’insieme, in passato basate sullo sviluppo di mappe sinottiche dove, a partire da curve isobariche (egual pressione) si individuava l’andamento delle circolazioni: in figura è riportato un esempio di carta meteorologica con isobare e fronti.



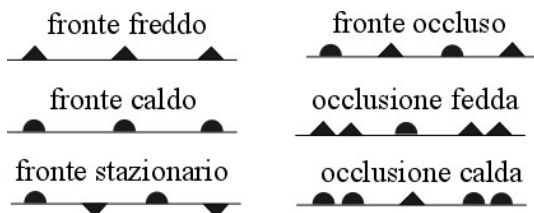
carta delle isobare del Dday, da [20]

Nella carta figurano lettere che identificano i punti di minima (L=low, B=bassa) e massima (H=high, A=alta) pressione attorno ai quali si verificano rispettivamente circolazioni a carattere ciclonico e anticiclonico.

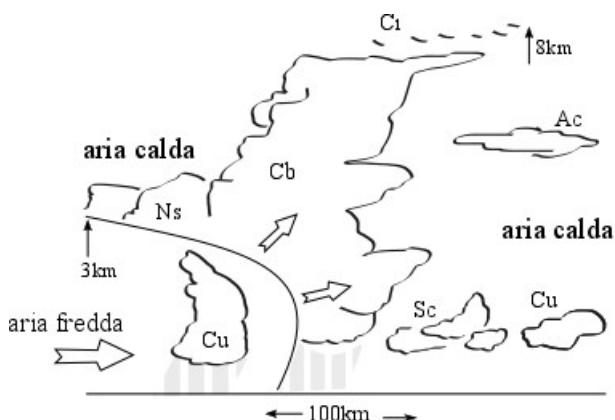
Oggi l'osservazione è estratta da una vasta rete di osservatori meteorologici, integrati da immagini da satellite e da radar, mentre l'analisi si basa su modelli ovvero calcoli numerici, che permettono di ottenere mappe di previsione con un'orizzonte temporale sempre maggiore.

L'osservazione satellitare - Grandi progressi sono stati consentiti dalle osservazioni dallo spazio, basate sull'uso di satelliti della famiglia Meteosat che permettono di ottenere fotografie della terra vista da *occhi* digitali sensibili in diverse gamme di REM: oltre ad immagini sul visibile l'uso dei falsi colori è usato per raffigurare mappe IR e UV che rappresentano temperatura al suolo e presenza dell'umidità (nuvolosità). La tecnologia satellitare è oggi utilizzata per un gran numero di usi: la posizione privilegiata consente di fornire osservazioni utili a fornire indicazioni sul territorio e anche sul paesaggio. Molte regioni Italiane ne fanno uso per monitorare l'uso e l'occupazione del suolo. È basata su satelliti anche l'ormai ubiquitaria tecnologia di posizionamento geografico GPS.

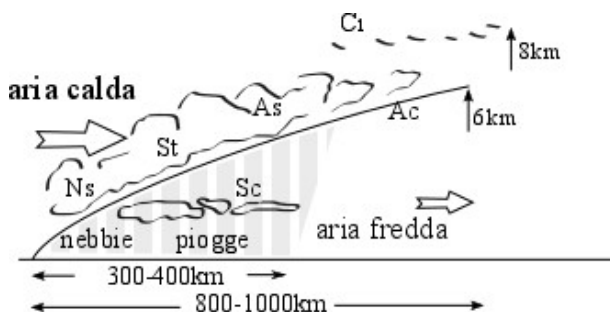
Fronti atmosferici - Nella carta sinottica illustrata sopra oltre alle isobare e ad uno strato informativo della geografia di riferimento, compaiono anche linee di separazione tra masse d'aria diverse che rappresentano i fronti, la cui simbologia è riportata nello schema sottostante.



Nel fronte freddo una massa d'aria fredda si insinua su un'area occupata da una massa più calda. I fronti freddi sono solitamente veloci ($> 50\text{km/h}$), sono preceduti da cumuli e cumulonemi dando luogo ad una fascia piovosa larga c.ca 100km, come schematizzato in figura (rielaborata da [3]).



Nel fronte caldo una massa d'aria calda (W) invade una zona dove è presente aria più fredda. I fronti caldi sono lenti e preceduti da una vasta fascia di copertura nuvolosa a cirri e cirrocumuli. All'avvicinarsi del fronte, la nuvolosità si ispessisce e la base delle nubi si avvicina al suolo, mentre la fascia piovosa ha un'ampiezza dell'ordine di 300 km, come schematizzato in figura (rielaborata da [3]).



Il tempo che caratterizza l'Italia - In inverno è tipico il passaggio di:

- aria fredda di origine artica marittima (mA) dalla Groenlandia o dalle isole Spitzberg oppure artica continentale (cA) dal mar di Barents o dalla Siberia;
- aria fredda di origine polare continentale di provenienza Nord-Atlantica, Labrador o Russia centrale (cP), oppure sempre di origine polare ma calda in quanto marittima (mP), proveniente dal Nord Atlantico, Russia (meridionale) e Balcani.

In estate, invece, è tipico il sopraggiungere di:

- masse d'aria calda polare continentale da direzioni diverse ma con medesima origine del caso discusso sopra: Nord Atlantico, Russia (meridionale) e Balcani (cP).

Più o meno in tutto l'anno posso poi giungere:

- masse d'aria fredda polare marittima (mP) proveniente dal Nord-Atlantico, Labrador o Russia centrale;
- masse d'aria calda di origine tropicale sia di provenienza marittima dai mari subtropicali e dalle Azzorre (mt) che continentale dal Nord-Africa e dai continenti subtropicali (ct).

3.2.1. Precipitazioni o idrometeore. Uno dei fenomeni atmosferici a carattere meteorico (meteora=ciò che viene dal cielo) più importanti è senz'altro rappresentato dalle precipitazioni. L'acqua può ricondursi al suolo in varie forme: quella più abitale è la precipitazione a carattere piovoso.

L'acqua che si condensa all'interno di una nube, inizialmente forma un aerosol fatto di microscopiche goccioline che fluttuano in ogni direzione. Solo dopo una serie di collisioni che portano tali goccioline a fondersi aumentando di dimensione, su di esse inizierà a prevalere l'effetto della gravità. Tale processo è accelerato dalla presenza di nuclei di condensazione, dati da sostanze ed aerosol dei più diversi materiali, inclusi gli inquinanti.

Piogge artificiali - In alcune zone del mondo (Israele, USA) per un periodo è stata popolare l'induzione delle piogge attraverso **inseminazione** per via aerea nelle nubi di nuclei di condensazione, data da polveri di Ioduro d'Argento, ghiaccio secco o Cloruro di Sodio. Anche in Italia si è fatto uso in passato di razzi per il bombardamento di nubi potenzialmente grandinogene.

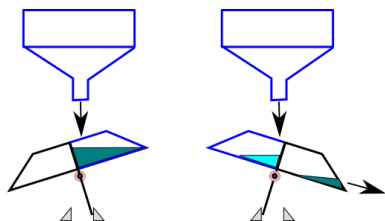
Delle precipitazioni la forma più leggera è rappresentata dalla pioviggine, data da gocce finissime (0.2 – 0.5mm) e molto ravvicinate tra di loro; si parla di pioggia quando le gocce hanno un diametro almeno di 0.5mm.

La neve è un tipo di precipitazione che solitamente ha luogo nella stagione fredda. Essa è costituita da acqua allo stato solido che si cristallizza seguendo precise regole geometriche per poi formare 'fiocchi' della più diversa struttura: il processo porta a varie tipologie di neve (vedi [14]).

La neve ha una densità variabile ma solitamente la si assume 10 volte più leggera dell'acqua liquida: $1\text{ cm di neve} = 1\text{ mm d'acqua}$.

In condizioni turbolente, quali all'interno di una nube temporalesca si possono realizzare moti convettivi di estrema intensità con correnti ascensionali che trascinano goccioline già formate ad alta quota trasformandole in ghiaccio: le precipitazioni vanno da formazioni quasi-nevose compatte ed amorfe derivanti da neve parzialmente fusa (pellet, gragnola), alla grandine (en: hail) che può raggiungere la dimensione di diversi centimetri.

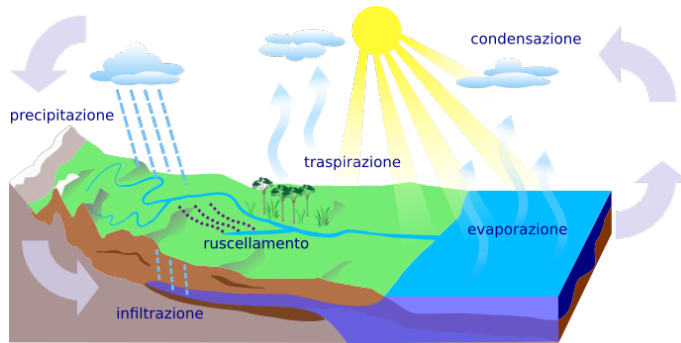
La misura delle precipitazioni - La misura delle piogge è diffusamente effettuata con pluviometri totalizzatori (rain gauges) o a conteggio: in quest'ultimo caso l'intensità dell'afflusso è misurata attraverso un sistema a bilancino basculante (vedi schema di figura) che misura l'evento in modo discreto come il numero di volte che si riempie una vaschetta di volume noto, che rapportato all'imbocco corrisponde alla risoluzione dell'apparato, abitualmente $0.1 - 0.2\text{ mm}$.



representazione del funzionamento del pluviometro a basculante

3.3. Idrologia superficiale

Molta parte della complessità dei processi idrologici interessa la superficie terrestre e sono riassunti alla grande scala in uno schema di flusso circolare noto come **ciclo dell'acqua**, che mostra come l'acqua possa essere considerata una risorsa rinnovabile.



Analizziamo i diversi processi che caratterizzano nel ciclo.

Intercettazione - Esaminare il ciclo dell'acqua a partire dalla precipitazione, essa è in primo luogo intercettata da diverse tipi di superfici, da cui può essere trattenuta o rilasciata ad uno strato sottostante. Le superfici intercettanti, sia litologiche che vegetali, artificiali o naturali, sono caratterizzate da una permeabilità, una pendenza, una rugosità ed altri caratteri fisici che determineranno la capacità di trattenerne una parte piuttosto che lasciarla defluire seguendo la conformazione della superficie. Il fenomeno dell'intercettazione è assai complesso dovuto alla stratificazione di molte coperture (si pensi ad un bosco) ed ha un carattere dinamico: l'intercettazione raggiunge un limite oltre il quale la copertura si satura.

Infiltrazione - Tale processo identifica la penetrazione alla superficie di un terreno inizialmente insaturo o di una superficie porosa in generale. L'infiltrazione determina nel suolo un fronte di avanzamento, cioè di una zona di passaggio tra il terreno alle condizioni iniziali (tipicamente più asciutto) alle nuove e più umide condizioni a partire dalla superficie. Sono le condizioni di umidità iniziali a determinare la velocità di infiltrazione. Nell'attività irrigua l'acqua è distribuita sulla superficie del terreno secondo diverse modalità: mentre nella aspersione e nell'irrigazione per sommersione possiamo pensare ad una infiltrazione pressoché 1-dimensionale, nell'irrigazione per scorrimento o in quella a goccia l'aggiunta d'acqua avviene in modo concentrato su una parte della superficie del terreno. Il fronte d'avanzamento avrà allora una forma di lobo più o meno allungato a seconda se prevale la gravità (terreni sabbiosi) o la ritenzione (terreni argillosi).

Exfiltrazione - In presenza di pendenza ai moti verticali si associano flussi sotto-superficiali che possono portare a locali saturazioni in corrispondenza della superficie del terreno con conseguenti fuoriuscire dalla superficie: queste zone possono essere associate a risorgive vere e proprie.

Ridistribuzione - L'acqua si ridistribuisce all'interno del terreno secondo una legge che pone in relazione la portata alla differenza di **potenziale idrico**³ totale in punti diversi e alla conducibilità idrica K , variabile che dipende dal tipo e condizioni del suolo e dalla quantità d'acqua θ presente. Considerando che questi fattori possono variare in modo consistente nell'arco dell'anno e in seguito all'intervento dell'uomo (es. lavorazioni, calpestamento, allagamento), il processo di redistribuzione è soggetto ad estrema variabilità sia spaziale che temporale.

Drenaggio & percolazione - Si tratta di processi che portano alla fuoriuscita di acqua da uno strato di terreno saturo verso la falda; nel caso del drenaggio il passaggio avviene da uno strato saturo del terreno ad uno strato saturo di tipo diverso (es. falda in strato ghiaioso) mentre la percolazione il passaggio avviene da uno strato di terreno saturo ad uno insaturo (es. strato ghiaioso insaturo).

Risalita capillare - Si tratta del processo attraverso cui l'acqua è richiamata verso l'alto da un terreno da uno strato saturo (falda) immediatamente sottostante.

Evaporazione - Il processo, già introdotto in precedenza, è quello che porta l'acqua nell'atmosfera, ed induce un richiamo verso l'alto dell'acqua presente nella profondità del terreno accoppiato ad una ridistribuzione dell'acqua al suo interno per uno spessore anche di parecchi centimetri. L'evaporazione, come su detto implica una cessione di energia per cui può portare anche ad una diminuzione della temperatura del suolo.

L'**evaporazione dell'acqua dal terreno**, solitamente assunto alla superficie, coinvolge in realtà uno spessore di diversi centimetri portando ad un raffreddamento dell'intero strato di terreno. È stato inoltre osservato che tale processo si svolge in due stadi distinti, uno abbastanza rapido guidato dal deficit di tensione di vapore (domanda evaporativa dell'atmosfera) ed uno, più lento, diretto dalla conducibilità gassosa della matrice del terreno.

Nelle superfici vegetate il processo prende il nome di evapotraspirazione (vedi avanti) e prevede l'asportazione di acqua dal terreno da parte delle radici delle piante, asportazione che determina zone di asciugamento verso cui l'acqua torna a fluire da zone più umide grazie al processo di redistribuzione.

³lavoro richiesto per estrarre una quantità unitaria d'acqua dal terreno

Cambio climatico e ciclo dell'acqua - Recentemente l'innalzamento medio delle temperature ha portato al discioglimento di consistenti masse di ghiaccio (polari e permafrost) e quindi ad un aumento della massa d'acqua coinvolta nel ciclo. Ne ha conseguito un inevitabile aumento dei flussi a scala globale, ma anche maggiori fluttuazioni a scala locale con più lunghi periodi di siccità ed eventi piovosi più intensi, con conseguente intensificazione di fenomeni idrologici dannosi per l'uomo (erosioni, frane) e riduzione della superficie coltivabile (perdita di suolo, desertificazione).

3.3.1. Il Bilancio Idrico. Il bilancio idrico è un'espressione che valuta le variazioni di acqua presente in un determinato suolo a partire dagli apporti (source) e dalle perdite (sink). Il computo è utilizzato per monitorare lo stato della riserva idrica di un certo sistema e può essere applicato tanto ad uno strato di suolo che ad un intero bacino idrografico. Esso è esprimibile nella forma:

$$Prc + Irr + Ris - Dre - Rnf - ET_e = \Delta H$$

dove con ΔH intendiamo la variazione del contenuto idrico di uno strato di suolo predefinito (in mm) nel periodo considerato, durante il quale sono avvenute:

Prc - precipitazione al netto delle perdite per evaporazione dalla vegetazione intercettante

Irr - irrigazioni artificiali e al netto dell'efficienza della tecnologia di distribuzione utilizzata

Ris - apporti per risalita capillare da falda;

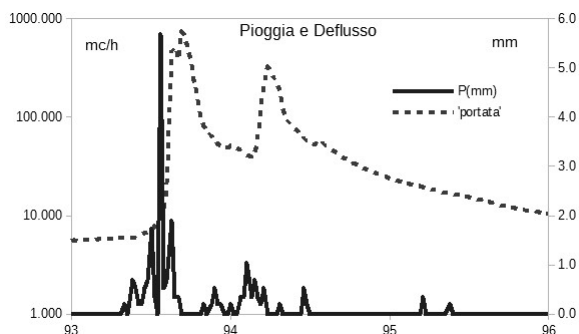
Dre - perdite per drenaggio;

Rnf - perdite per ruscellamento superficiale

ET_e - perdite per evapotraspirazione

Nei bacini irrigui il bilancio può prevedere afflussi e perdite da canali e scoline appartenenti al sistema di distribuzione.

3.3.2. Ruscellamento e deflusso superficiale. Quando la capacità di infiltrazione di una superficie è inferiore all'intensità dell'afflusso meteorico, l'eccesso prende a scorrere in superficie seguendo le pendenze e determinando infine la formazione dei corsi d'acqua. Nella attitudine al ruscellamento la copertura del terreno è fondamentale: è essa la prima ad intercettare le precipitazioni ed attenuare l'energia dell'impatto. Inoltre l'ombreggiamento che offre al sole impedisce quell'essiccamento rapido che facilita la formazione di croste. Uso del suolo e copertura (stagionale) sono quindi fondamentali nelle dinamiche del ruscellamento. Al ruscellamento sono collegati seri problemi di qualità



delle acque e di regimazione associati a problemi ordine civile e sociale classificati tra le catastrofi naturali più frequenti.

Il **deflusso** è ciò che osserviamo a valle di un bacino idrologico che riassume nel tempo tutti i singoli processi di ruscellamento localizzati, e che si riuniscono assieme in un corso d'acqua in termini di una portata.

In figura è riportato un insieme di registrazioni in cui, a fianco della pioggia è riportato il deflusso come portata di un corso d'acqua che raccoglie tutta l'acqua captata da ogni tipo di superficie, unite a quelle fuoriuscite dei flussi ipodermici ed essere infine raccolte da un reticolo idrografico. Nella figura sotto sono è riportato l'andamento di piogge e deflusso misurate in corrispondenza di un evento.

3.3.3. Erosione. L'erosione è dal punto di vista geologico un lento sgretolamento del terreno o di rocce prodotto dagli agenti atmosferici, quali temperatura, vento (erosione eolica), fiumi (erosione fluviale), mare (erosione marina o abrasione), ghiaccio (erosione glaciale o esarazione), pioggia.

L'erosione è un fenomeno profondamente legato al ruscellamento e determina un trasporto di materiale solido in sospensione compresi nutrienti che di per se sono poco mobili (es. fosforo).

L'erosione è un processo naturale che ha luogo in tutti gli ecosistemi terrestri, ma che è accelerato dalle attività antropiche.

In tale processo si possono distinguere le seguenti fasi:

- **Splash** - Collegato al fenomeno dell'intercettazione descritto sopra, si tratta del processo associato all'impatto della goccia di pioggia sul terreno, che vede il distacco delle particelle o granulo di materiale dal substrato ed il trasporto vero e proprio; è la ragione scatenante dell'erosione e determina l'energia che si libera sull'evento e determina il distacco delle particelle;

- **Micro-ponding** - fase di saturazione delle micro-asperità superficiali associate ad un afflusso superiore alla velocità di infiltrazione, connessa alla micro-morfologia, rugosità del terreno, presenza di vegetazione.
- **Sheet** - è quella associata al ruscellamento inteso come scorrimento laminare; solitamente sottovalutata, questa tipologia di erosione primaria è invece ragione di ampie perdite; essa si mantiene solitamente solo per pochi metri, prima che il flusso si concentri in canaletti (rills); essa non determina ulteriore distacco di particelle, ma solo trasporto di queste, solitamente le più fini e naturalmente dei relativi materiali adsorbiti;
- **Rill** - riguarda la formazione di tracce superficiali e canaletti, di dimensione via via crescente e con portate e velocità di flusso crescenti; a questo tipo di erosione sono particolarmente prone i sistemi di coltura a file; tale flusso è così intenso da determinare esso stesso un incremento di particelle distaccate systems.
- **Gully** - è lo stadio successivo, quello associato alla formazione di ampie scanalature, quelle con oltre 30cm di profondità e associate a perdite di suolo di entità elevata (zone calanchive); l'acqua, scorrendo sia sulla superficie che nei tagli interni (rills) provoca continui rimodellamenti, erosioni e smottamenti della parete collinare sottoposta a tale processo;
- **Tunnel** - è una forma di erosione causata da flussi idrici di ampia portata nel sottosuolo di terreni sciolti dove il flusso determina appunto lo scavo di vere proprie gallerie; il fenomeno è ben noto ai geologi in quanto responsabile anche della creazione di vere e proprie grotte.

Il rischio idrogeologico è un concetto legato all'interazione tra il fattore acqua (idro: pioggia e corsi d'acqua) ed il terreno che la ospita (geo: suolo, roccia, detriti), ed è legato alla probabilità del verificarsi di eventi naturali come frane e valanghe. Se l'acqua può già da sola essere pericolosa per l'uomo, lo è ancor di più quando diventa agente di trasporto, trascinando roccia e fango, erodendo il suolo e determinando il cedimento di edifici, ponti e altre infrastrutture.

3.3.4. Il Trasporto di agenti inquinanti. Recentemente l'agricoltura è stata spinta a vedere il terreno non solo come fattore produttivo, ma anche in riferimento a problematiche ambientali e sociali, quali l'inquinamento delle risorse idriche e la conservazione del suolo.

Con **lisciviazione** si intende il trasporto di sostanze disciolte e sospese nella soluzione circolante (inquinanti, nutrienti, particelle di vario tipo) da parte dell'acqua, sia in corrispondenza di eventi meteorici

che irrigazioni, verso strati più profondi e l'acquifero. Con **dilavamento** si intende invece un fenomeno analogo ma che interessa le acque superficiali attraverso il ruscellamento.

Qualunque sostanza presente in un mezzo fluido si muove seguendo due leggi fondamentali, una che rappresenta il trasporto puro o **advezione** (si pensi a come è trasportata dalla corrente una foglia sulla superficie di un fiume), ed una che invece la **disperde** nello spazio (si pensi ad una goccia di vino rosso in un bicchiere d'acqua).

Molti soluti interagiscono con il terreno attraverso l'instaurazione di legami ed affinità di tipo chimico. Questo fenomeno, detto **adsorbimento**, determina due effetti importanti: un ritardo di propagazione del prodotto nella direzione del flusso e immobilizzazione di una parte del prodotto, solitamente in superficie.

Maggiore è l'adsorbimento, minore è la velocità con cui un prodotto è lisciviato, maggiore è il tempo per il quale può essere assimilato dalle radici e dagli organismi superficiali ed essere metabolizzato, minore è la velocità con cui giunge in falda ad elevate concentrazioni (in cui il metabolismo è ridotto da una minor presenza di organismi) divenendo potenzialmente inquinante per le acque dolci di uso civile.

3.4. Esercizi

Quesito - Cos'è l'evaporazione ?

Quesito - Cos'è e quanto vale il calore latente di evaporazione ?

Quesito - Che differenza c'è tra gas e vapore ?

Quesito - Cos'è il diagramma psicrometrico e come lo si utilizza ?

Suggerimento - Tracciare uno schema del diagramma

Quesito - Cosa si intende per condensazione ?

Quesito - Come avviene la condensazione per miscelazione ?

Esercizio - Se nell'atmosfera il vapore è presente con una pressione parziale di $e = 9 \text{ hPa}$, qual'è l'umidità relativa corrispondente alle temperature di 18° e 25° sapendo che le corrispondenti pressioni di vapor saturo valgono $e_s(18) = 20.6 \text{ hPa}$ ed $e_s(25) = 31.7 \text{ hPa}$
Soluzione - in base alla definizione di $UR = 100 \cdot e/e_s$ ottengo:

$$UR(18) = 9/20.6 = 43.6\%$$

$$UR(18) = 9/31.7 = 28.4\%$$

Esercizio - In una stanza di $5\text{m} \cdot 4\text{m} \cdot 3\text{m}$ porto la temperatura da 18° a 25° . Quanta acqua devo evaporare affinché l'umidità relativa iniziale del 50% rimanga costante ?

Soluzione - utilizzando il diagramma psicrometrico, in corrispondenza della curva del 50 di umidità, alla temperatura di 18° e di 25° ottengo rispettivamente i valori di umidità assoluta di 6.5 e $10 \text{ g}_{\text{vapore}}/\text{kg}_{\text{aria-secca}}$. Poiché la densità dell'aria a T ambiente è c.ca $1.3 \text{ kg}/\text{m}^3$ (vedi esercizio precedente) si ricava la massa d'aria secca della stanza:
 $m_a = 1.3 \cdot 5 \cdot 4 \cdot 3 = 77.4 \text{ m}^3$ per cui la differenza del contenuto idrico dei due stati è:
 $m_w = 77.4 \cdot (10 - 6.5) = 271 \text{ g}$

Quesito - Cosa si intende per bulbo umido ?

Quesito - Che differenza c'è tra rugiada e brina ?

Quesito - Perché la temperatura di -4°C è così importante ?

Quesito - Cos'è la meteorologia ?

Quesito - Cosa significa la parola 'sinottico' ?

Quesito - Cosa si intende per 'isobara' ?

Quesito - Cos'è un 'fronte' ?

Quesito - Quali tipi di 'fronti' conosci ?

Quesito - Come si presenta un fronte freddo ?

Quesito - Sapresti caratterizzare un fronte caldo ?

Quesito - Quali sono le principali tipologie di idrometeorie ?

Quesito - A quanti *mm* di pioggia corrispondono 10*cm* di neve ?

Quesito - Come si può misurare l'entità e l'intensità di un evento piovoso ?

Quesito - Sapresti descrivere il ciclo dell'acqua ? Servirsi di un diagramma.

Quesito - Quali processi include il ciclo dell'acqua ? Elencarli.

Quesito - Cosa sono infiltrazione ed exfiltrazione ?

Quesito - Cosa si intende per drenaggio e percolazione ?

Quesito - Esprimere con una formula il bilancio idrico indicando il significato dei simboli utilizzati.

Quesito - Che differenza esiste tra ruscellamento e deflusso superficiale ?

Quesito - Cosa si intende per erosione ?

Quesito - Come ha inizio e si sviluppa il fenomeno erosivo ?

Quesito - Attraverso quali processi ha luogo il trasporto di inquinanti nel suolo ?

Quesito - Cosa si intende per lisciviazione ?

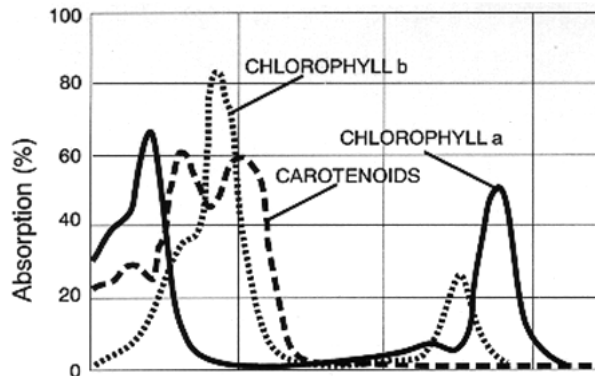
Gli Organismi Viventi e l'Ambiente

4.1. La Radiazione solare e le piante verdi

Il sole fornisce tutta l'energia che alimenta tutti gli organismi viventi per i quali essa ha tre importanti valenze. Essa è innanzitutto calore, fondamentale per i meccanismi metabolici. In quanto calore essa innesca anche la traspirazione che rappresenta un meccanismo di raffreddamento ed unitamente quel flusso che veicola elementi nutritivi dall'apparato radicale verso gli organi epigei. La stessa radiazione solare permette infine attraverso il processo fotosintetico, e quindi a partire solamente da acqua e dall'anidride carbonica, di ottenere ogni ingrediente necessario allo sviluppo e alla crescita delle piante, elemento di avvio di ogni ecosistema.

4.1.1. La fotosintesi. Il processo fotosintetico, alla base dell'accrescimento di ogni pianta verde, avviene in siti appositi detti cloroplasti dove alcuni pigmenti sono in grado di sfruttare diverse gamme della radiazione solare per catturare energia ed utilizzarla per assimilare il carbonio ed alimentare i propri tessuti.

L'intervallo di frequenze che interessa questo processo è detta radiazione Fotosinteticamente Attiva (PAR-Photosynthetically Active Radiation); lo spettro di assorbimento dei diversi pigmenti è riportato nella figura sottostante (da [25]).



Poichè la PAR ha nella fotosintesi il ruolo che ha un reagente in una reazione chimica, la sua intensità si misura in Einstein, cioè **moli di fotoni**. Molte lampade professionali utilizzate nelle colture protette esprimono già la potenza emissiva utilizzando gli Einstein come unità di misura.

4.1.2. Efficienza di Assimilazione. Della quantità di PAR che raggiunge le superfici verdi di una pianta, la frazione utilizzata per la fotosintesi è normalmente molto bassa (c.ca 5%); tale efficienza è legata alla densità dei pigmenti in cui ha luogo il meccanismo fotosintetico (clorofille, carotenoidi).

Per quanto riguarda la densità dei pigmenti, si tratta di una caratteristica tanto della specie quanto delle singole foglie, la cui collocazione al sole all'ombra tende a determinarne la densità. Si parla per questo di specie / foglie:

- eliofile se godono di una forte insolazione, quali piante da pieno campo, da climi aridi e le stesse piante acquatiche;
- sciafile se sono adattate a condizioni ombreggiate, quali piante da appartamento, adatte a luoghi ombreggiati e sottobosco, nonché piante da acquario.

Per quanto riguarda il meccanismo fotosintetico, la gran parte delle specie conosciute fanno riferimento a 3 schemi, denominati C3 (Calvin-Benson), C4 (o Hatch-Slack) e CAM, i primi due denominati in base al numero di atomi di C di cui è formata la molecola precursore sintetizzata dal processo, il terzo è invece quello utilizzato dalle piante succulente (p.grasse). Le piante C4 sono quelle caratterizzate da maggiori tassi di crescita: a questa classe appartengono piante quali il mais ed altre erbacee adattate ad alte temperature nonché la maggioranza delle specie perenni. Le piante C3 sono invece caratterizzate da un minor tasso di accrescimento, ma generalmente adatte a temperature più basse. La differente capacità di assimilazione trova naturalmente riscontro nella biomassa secca accumulata a fine ciclo produttivo.

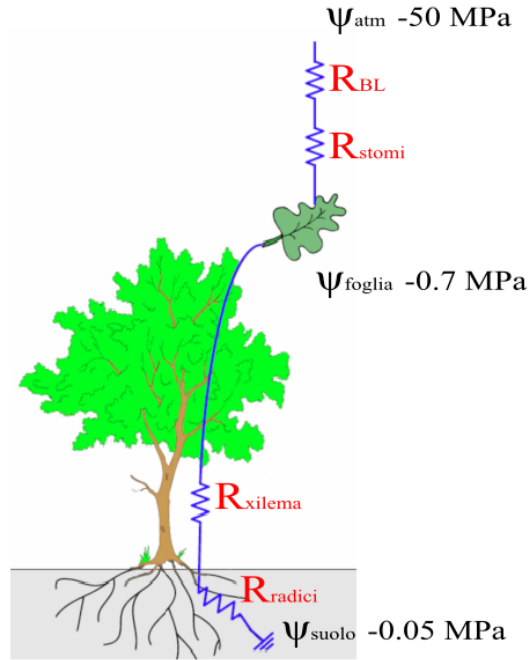
4.1.3. Misure dell'Accrescimento. Alcune variabili biometriche sono fondamentali nel descrivere (e misurare) l'accumulo di biomassa (W) da parte di una pianta, al netto di quanta parte di essa viene persa per il metabolismo (respirazione). Le variabili più importanti a tale scopo sono rappresentate da:

CGR: (crop grow rate) tasso di accrescimento

$$CGR = \frac{dW/dt}{A} \approx \frac{1}{A} \frac{W_2 - W_1}{t_2 - t_1}$$

dove A è la superficie di riferimento (es. $1m^2$).

RGR: (relative grow rate) tasso di riproduzione, ovvero il tasso di crescita per unità di biomassa



modello elettrodinamico della pianta

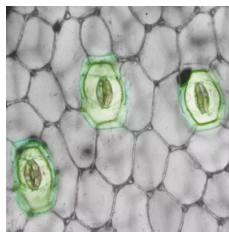
$$RGR = \frac{dW/dt}{W} = \frac{d(\ln W)}{t} \approx \frac{\ln W_2 - \ln W_1}{t_2 - t_1}$$

LAI: (Leaf Area index) indice d'area fogliare, è un indicatore della copertura effettiva del suolo da parte dell'apparato fogliare, che raggiunge la totalità per valori compresi tra 3 e 5. Essa è in relazione con la biomassa, attraverso il rapporto superficie / peso LWR (Leaf Weight Ratio).

4.1.4. Il flusso dell'acqua dalle radici all'atmosfera. La pianta può essere considerata una **macchina ad acqua**. È la disponibilità idrica a permettere ad una pianta di crescere e svilupparsi, poiché il **flusso idrico** permette alla pianta di disporre delle sostanze nutritive presenti a livello radicale. Tale flusso è attivato da una differenza di condizioni tra suolo ed atmosfera, ed in esso la pianta ha il ruolo di una interfaccia porosa. Per rappresentare il processo l'acqua è sovente assimilata ad una corrente elettrica che fluisce attraverso dei conduttori che offrono una diversa resistenza al suo passaggio, e che sono alimentati da una pila avente i capi uno nel suolo ed uno nell'atmosfera, come illustrato nella figura, dove il potenziale elettrico è sostituito da quello idrico in Pascal.

Al termine del suo cammino l'acqua trova strutture particolari, gli stomi, solitamente situate nella pagina inferiore delle foglie (vedi figura sotto, da [2]).

Gli stomi sono strutture composte da una camera stomatica ed una apertura variabile che risente delle condizioni fisiologiche della pianta: condizioni di stress portano a ridurre se non a chiudere l'apertura impedendo alla pianta di perdere ulteriore acqua.



4.1.5. Evapotraspirazione. A scala colturale è difficile separare il termine **traspirativo** da quello **evaporativo** del suolo, per cui negli anni 1960 è stata coniata una grandezza composta, l'**evapotraspirazione** (ET). Dal punto di vista operativo, l' ET fa capo ad alcune grandezze specifiche:

- evapotraspirazione di riferimento $ET_0 - ET_r$ identifica la perdita idrica di una superficie che per convenzione è rappresentata da un prato sfalcato e mantenuto in ottimo idrico (FAO, 1986)
- evapotraspirato potenziale $ET_c, ET_p, ET_{pot}, ET_{max}$ che si riferisce alla superficie vegetata cui ci stiamo interessando, la maggior parte degli usi si riferiscono ad una coltura, **in condizioni di ottimo idrico**. Tale valore dipende dalla stagione ed è relazionato al valore precedente attraverso un coefficiente detto **coefficiente colturale** K_c :

$$ET_c = K_c \cdot ET_0$$

- evapotraspirato effettivo o reale, ET_r, ET_e, ET_{eff} si riferisce all' ET di una coltura con limitata disponibilità idrica e quindi non sempre in grado di traspirare l'intera **domanda evapotraspirativa** atmosferica. Tale valore è quindi estremamente variabile e dipende principalmente dalle condizioni idriche del terreno.

4.1.6. ET ed Irrigazione. Uno dei principali usi dell' ET è nel settore irriguo, in cui l'**intervento irriguo** è basato sulla determinazione di 3 aspetti:

- individuazione del momento dell'intervento
- stima della quantità d'acqua da apportare
- calcolo dell'intensità (portata dell'impianto) riferita all'unità di superficie

Ciascuno di questi punti dipende naturalmente dalla disponibilità d'acqua reale, che dipende dalle sorgenti locali (pozzo) o disponibilità esterne (es. enti erogatori quali consorzi di bonifica). Se il secondo ed il terzo punto dipendono anche dall'infrastruttura irrigua, dal metodo di

eogazione (impianti) e dal terreno, è tuttavia il primo punto quello più delicato, per il quale esistono principalmente 3 metodi:

- stima dello stato della pianta - nonostante i numerosi metodi individuati, spesso basati sull'osservazione diretta, si sono ad oggi dimostrati poco tempestivi e non privi di rischi per lo stato delle piante;
- stima dello stato del suolo, che a sua volta può essere fatta in modo:
 - diretto, attraverso osservazioni di variabili in relazione all'acqua disponibile per la pianta, diffuso in diversi settori, limitato dal costo e dalla disponibilità di servizi che ne permettono la reale adottabilità;
 - indiretto, attraverso il bilancio idrico, metodo correntemente molto diffuso, che **poggia sulla stima dell'ET**

4.1.7. Il Bilancio Idrico. Nel bilancio idrico il terreno è visto come un serbatoio al cui interno sia un certo livello d'acqua, livello al cui innalzamento contribuiscono le precipitazioni e le irrigazioni, e al cui abbassamento l'attingimento radicale. Tale livello è denominato Acqua Disponibile Totale (ADT), per cui il bilancio idrico può essere espresso come:

$$Prc + Irr - ET_{eff} = \Delta ADT$$

L'espressione è stata volutamente semplificata, omettendo termini quali ruscellamento, drenaggio e risalita capillare, con un contributo spesso trascurabile (nonché difficile da stimare).

Ogni suolo, considerata la profondità radicale, possiede un valore massimo di ADT_{max} connesso alla stratigrafia e a parametri caratteristici del suolo quali Capacità Idrica di Campo ed il Coefficiente di Appassimento.

4.1.8. Stima dell' ET_0 . Le numerose misure di ET compiute negli anni hanno portato a sviluppare tutta una serie di modelli empirici orientati alla stima dell' ET_0 . Uno dei primi metodi di stima passa attraverso la stima e la misura dell'evaporato da una vasca piena d'acqua (ET_{pan}) dispositivo definito in manuali appositi ([7]).

A partire dall' ET_{pan} si ricava il valore della ET_0 facendo uso di un coefficiente empirico ambientale:

$$ET_0 = k_{pan} \cdot E_{pan}$$

Thornthwaite - Una delle prime espressioni (risale al 1948) utilizzate per la stima dell' ET_0 su base mensile è basata essenzialmente sulla temperatura:

$$ET_o = 0.75 \cdot L \cdot \left[\frac{10 \cdot \bar{T}_m}{J} \right]^\alpha$$

dove L è la lunghezza del giorno (calcolata), la temperatura media mensile \bar{T}_m e J è l'indice di calore $J = \sum (T_m/5)^{1.5141}$

Blaney-Criddle - Si tratta di un metodo che risale al 1950 particolarmente semplice in quanto richiede solo la temperatura (T , in °C):

$$ET_o = c \cdot [p \cdot (8 + 0.46T)]$$

dove p è la percentuale di ore di luce medie giornaliere annue mentre c è un fattore correttivo che dipende dall'umidità relativa minima, dalle ore di sole e dalla ventosità.

Metodo della Radiazione - Si tratta di una espressione che risale al 1957 (Makkink) sviluppata in un periodo in cui si stavano diffondendo i primi radiometri per la misura della radiazione solare al suolo (R_s). Essa è data da:

$$ET_o = c \cdot W \cdot R_s$$

dove W è un fattore di peso che dipende dalla temperatura e dall'altitudine e c un fattore correttivo che dipende dall'umidità relativa e dalla ventosità.

Uso delle formule per la stima dell' ET_p

. L'utilizzo delle formule appena viste, ancora praticato per via della loro semplicità, richiede tuttavia la corretta impostazione dei parametri che a loro volta dipendono da grandezze ambientali medie non esplicitamente presenti nella formula, originalmente ricavate da tabelle e nomogrammi ([7])

Ciò che cambia tra i metodi di stima è dato dalla lunghezza del periodo per il quale la stima può considerarsi valida. Il dato ottenuto con le formule viste sopra va considerato attendibile solo come dato medio sul periodo. Tutte queste formule non hanno un periodo di validità inferiore alla settimana, e quindi scarsamente idonee per calcolare dei bilanci idrici su scala giornaliera.

L'equazione di Penmann

. Contemporanea all'espressione di Thorntwaite (1948) è un'espressione, anch'essa derivata per via empirica e molto diffusa, che si dimostrò anni dopo coincidere con l'espressione ottenuta da Monteith per il bilancio energetico del bulbo umido, e quindi corretta dal punto di vista della teoria fisica. L'espressione di Penmann-Monteith (del 1965) evidenzia come l' ET_o dipenda da 4 grandezze atmosferiche: la radiazione solare netta (R_n), umidità (e), temperatura (T) e ventosità (u_2 , vento a 2m di altezza). L'espressione nella versione originale era ancora troppo

¹L'indice di calore J compare anche nell'esponente dato da:

$\alpha = 0.492 + J \cdot 0.018 + J^2 \cdot 7.71 \cdot 10^{-5} + J^3 \cdot 6.75 \cdot 10^{-7}$.

complessa per usi operativi per cui una commissione FAO ne ha prodotto una semplificazione. L'equazione Penman-Monteith-FAO è data dall'espressione:

$$ET_o = \frac{0.408 \cdot \Delta(T) \cdot R_n + \gamma \cdot [900/T + 273] \cdot u_2 \cdot [e_s - e]}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0.34 \cdot u_2)}$$

Dei modelli visti esso è l'unico in grado di assicurare stime valide anche su brevi periodi (es. orario).

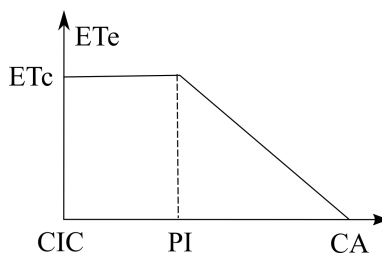
Nell'espressione di Penman-Monteith compare il deficit di pressione di vapore ($VPD=e_s - e$) definito nella sezione introduttiva sull'umidità, che sottolinea la rilevanza dell'umidità nel fenomeno traspirativo. Nella tabella sottostante sono riportati alcuni sintomi associati a valori anomali di VPD.

UR alta / basso VPD	UR bassa / alto VPD
deficienze di minerali	appassimento
guttazione	arrotolamento
comparsa di malattie	pianta rachitica
crescita lenta	foglie increspate / coriacee

4.1.9. Evapotraspirazione di una superficie in stress. A causa di perdite d'acqua per evaporazione superficiale o per estrazione radicale, la RU del terreno diminuisce gradualmente, fino a che la poca acqua presente non è più estraibile dalla pianta (CA).

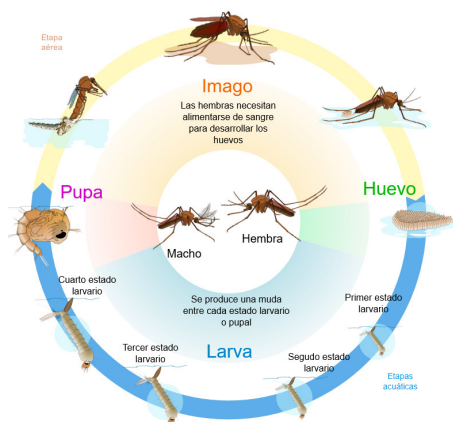
La pianta non risente immediatamente di valori di umidità inferiori alla CIC, ovvero di riduzioni della AD, ma ad un valore di umidità critico che è solitamente individuato empiricamente e che nella pratica irrigua prende il nome di soglia o punto di intervento irriguo (PI). Tale valore è utilizzato per individuare uno dei criteri più importanti della programmazione irrigua, il momento dell'intervento.

Nella figura a lato è schematizzato l'andamento dell'ET all'abbassarsi del contenuto idrico in un suolo: dal punto di vista operativo si assume che la pianta non risenta della ridotta disponibilità idrica fino al punto di intervento (PI), per poi ridurre progressivamente l'ET reale fino a che l'umidità non raggiunge la CA, a cui l'ET si annulla.



4.2. Fenologia

La fenologia è la descrizione morfologica dell'aspetto di un individuo nell'arco della sua esistenza. Tale descrizione si basa in genere sull'identificazione di fasi fenologiche per le quali sono state utilizzate diverse scale, tipicamente basate su un indici progressivi.



schema delle fasi di sviluppo della zanzara [23]

Recentemente si è diffusa per i vegetali la scala BBCH [15] che permette di dettagliare in modo diverso gruppi di colture.

4.2.1. La temperatura e la pianta. Ogni pianta ha una catena metabolica determinata da diverse combinazioni enzimatiche che fanno sì che essa risponde alla temperatura in modo diverso da tutte le altre. per questo ogni sbalzo di temperatura può avere un effetto sul metabolismo, p.es. favorire il passaggio da una fase fenologica alla successiva (es. riproduttiva) o inibire anche in modo irreversibile processi in atto.

Ogni pianta ha una temperatura ottimale, **temperature cardinali** (minima e massima) che definiscono un intervallo di temperature al di fuori del quale il metabolismo si arresta e **temperature critiche**, soglie oltre le quali si verificano effetti metabolici irreversibili.

4.2.2. Tipologie di piante. Sono dette **microterme** le piante con temperatura cardinale minima bassa (es. per grano e grano, pisello intorno ai 5°C), temperatura ottimale compresa tra i 15 ed i 23°C; le fasi di maggiore crescita attiva si verificano durante il periodo più fresco della stagione vegetativa; durante l'estate possono entrare in dormienza e subire danni per il caldo eccessivo. Sono specie che per questo sono seminate in autunno o inizio inverno.

Sono dette invece **macroterme** le piante con temperatura cardinale minima (es. melone, canna da zucchero) intorno ai 15°C, temperatura ottimale fra i 27 ed i 35°C. A temperature critiche comprese tra

0° e 13°C, molte specie mettono in atto un meccanismo di sopravvivenza (dormienza) contraddistinto dalla perdita di clorofilla nei tessuti (ingiallimento); sono tipicamente specie a semina primaverile.

Le più importanti colture erbacee sono state infatti classificate in base alla temperatura minima di accrescimento, distinguendo il processo di assimilazione (T_{opt}) da quello di vegetazione (T_{min}) come da tabella:

gruppo	colture	Topt (°C)	Tmin (°C)
I	C3: frumento, orzo, patata,	15-20	> 5
II	C3: riso, soia,	25-30	>20
III	C4: canna da z.	25-30	= 20
IV	C4: mais, sorgo,		> 15

4.2.3. Somme termiche. Le temperature, oltre a determinare stress nella pianta quando sono estremamente basse o alte, segnano lo scorrere del tempo.

Candolle (1855) fu uno dei primi ad introdurre il concetto di fabbisogno calorico, concetto oggi utilizzato sia in ambito vegetale che entomologico. Tale concetto è oggi in gran parte basato sul concetto di somma termica ST la quale è calcolata a partire dalla temperatura media giornaliera osservata \bar{T}_a e da una temperatura basale della pianta T_o . La somma termica al giorno d di uno stadio fenologico che ha avuto inizio il giorno d_{ini} vale:

$$ST_d = \sum_{d_{ini}}^d (\bar{T}_a - T_o)$$

Nella somma non vanno inclusi i termini negativi. La somma termica alla quale si ha il completamento dello stadio analizzato (ST_{dur}) può essere utilizzabile per ottenere un'età fisiologica o un indice di maturazione:

$$\tau_d = \frac{\sum_{d_{ini}}^d (\bar{T}_d - T_{min})}{ST_{dur}}$$

Il completamento della fase si ottiene quando l'indice assume il valore unitario.

Alcune colture da seminativo (es. frumento) per completare lo sviluppo della fase riproduttiva (stabilizzare la cinetica delle divisioni mitotiche) hanno necessità di un periodo di freddo detto vernalizzazione, rappresentabile anch'esso da una sommatoria di gradi giorno (gradi freddo), ottenuti facendo uso di temperature massime di 1-6 °C.

4.2.4. La durata del giorno. Oltre alle temperature, anche la durata giornaliera dell'illuminazione può in molte piante portare ad una produzione di ormoni in grado di determinare il passaggio di una pianta alla fase fenologica riproduttiva. In particolare prendono il nome di

longidiurne e di brevidiurne le piante in cui, al sopraggiungere di giorni lunghi o corti, si innesca la fase riproduttiva, e quindi la fioritura, che in molti casi condiziona la produzione.

Nella tabella sotto sono riportate alcune colture di cui è nota la sensibilità alla lunghezza del giorno:

- Longidiurne: frumento, avena, erba medica, pisello, patata
- Neutrodiurne: mais, pomodoro
- Brevidiurne: riso, cavolfiore, crisantemo

In serricoltura l'oscuramento e l'illuminazione sono comunemente praticate per l'induzione a fiore.

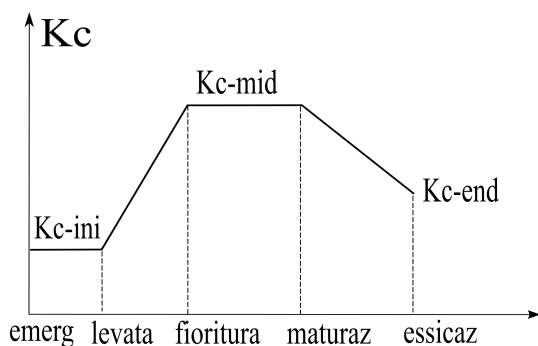
4.2.5. Il Coefficiente Culturale. Come detto in precedenza, l'ET di una superficie vegetata generica differisce dall'ET di una superficie di riferimento, e ciò è principalmente causato dall'andamento stagionale.

Mentre la superficie di riferimento è rappresentata da un prato stabile perenne e mantenuto da sfalci ed irrigazioni costanti, una superficie generica può essere costituita da più specie, ciascuna con la sua evoluzione fenologica e relativa copertura vegetativa.

Nel caso di una coltura tali differenze sono espresse da un coefficiente, il K_c , che assume un diverso valore durante la stagione.

Per una monocoltura, dal momento della semina alla maturazione, l'andamento del K_c è schematizzabile con la spezzata riportata in figura in cui i valori di K_c sono quelli corrispondenti agli stadi fenologici fondamentali:

- semina / emergenza / inizio accestimento
- inizio levata
- fioritura (antesi)
- maturazione
- senescenza



Schema dell'andamento del K_c in funzione dei principali stadi fenologici

Allo scopo la scala temporale può essere definita tanto in giorni che come età fisiologica e quindi come somma termica.

4.3. Stress ed agenti atmosferici avversi

Le condizioni atmosferiche possono avere sulle piante effetti di ampiezza molto diversa, effetti che possono essere clasificati dal punto di vista della pianta e di quella dell'uomo, per il quale la pianta può avere una funzione, come quella produttiva. L'innesco della fase riproduttiva, fondamentale per l'ottenimento di certi prodotti (granella, frutta,etc) per una pianta può significare l'inizio della fine (specie erbacee quali il frumento) e l'adozione della strategia che gli rimane per continuare la sua vita attraverso la sua progenie, strategia 'di riserva' e quindi 'non ottimale'.

- in **condizioni ottimali** la pianta continuare a vegetare (senza fiori ne frutti) con un tasso di invecchiamento ed un tasso di accrescimento che rispondono alle regole incrementali viste sopra: somme termiche;
- **momenti e condizioni di stress** anche prolungate sono quelle che portano la pianta ad una adozione **irreversibile** di nuove strategie, quali la fioritura e la fruttificazione: l'uomo fa sovente uso dello stress per migliorare qualitativamente o quantitativamente un prodotto, come nel caso dello stress idrico controllato in frutticoltura o il controllo delle ore di luce in floricoltura;
- **avversità atmosferiche** rappresentano l'attraversamento di un limite oltre il quale la pianta trova a confrontarsi con un'ambiente decisamente più ostile. Quando non controllabile lo stress può portare anche a perdite di 'prodotto commerciale' consistenti o totali, come nel caso di un periodo di **siccità** che porta forti riduzioni dell'acqua disponibile alla pianta portandola a dover sopportare **stress prolungati** che possono comprometterne l'esistenza. Anche il **vento**, quando sommato ad un caldo intenso o assieme all precipitazioni può, può essere molto dannoso per la vegetazione. Le piogge, bagnando le foglie determinano un carico da sopportare per le piante ed un allentamento del terreno in cui affondano le radici, per cui il vento può più facilmente determinarne il collasso: nel caso delle colture erbacee si parla di allettamento.
- **gli agenti atmosferici avversi** hanno un ruolo ancor più schiacciante sulla vegetazione, così come sull'uomo e le sue opere. Perturbazioni di particolare intensità, quali cicloni extratropicali ma anche temporali di elevata intensità (bombe d'acqua) e durata possono portare ad **allagamenti** ed includere fenomeni **grandinigeni**, con effetti distruttivi sulla vegetazione, al

livello di quelli raggiunti da un **incendio**. Data la difficoltà di contrastare il fenomeno, oltre alla diffusa soluzione assicurativa, la forma di difesa preventiva più praticata è quella basata su reti antigrandine (diffusa nella frutticoltura).

Irraggiamento notturno e condensazioni - Nelle ore notturne in assenza di nuvolosità si verifica una progressiva perdita di calore dei corpi esposti verso l'atmosfera tanto che i valori più bassi si registrano nei momenti immediatamente precedenti all'alba: per questo sulle superfici è possibile osservare importanti condensazioni (es. rugiada). Essi permettono a certe specie (es. xerofite) di rifornirsi di acqua anche in periodi di estrema scarsità di piogge. La presenza di acqua determina invece in tanti altri casi (es. nella vite) l'innescio di patologie fungine legate alla realizzazione di condizioni favorevoli alla germinazione delle spore. Inoltre in pianura gli strati d'aria prossimi al suolo possono facilmente scendere sotto gli 0°C rendendosi pericolose per germogli e piantine trapiantate da poco tempo. Nelle valli alpine, dove è diffusa la coltura del melo, è comune la pratica dell'irrigazione per asperzione sopra-chioma nel periodo della formazione del frutticino: anche nel caso che si formi uno strato di gelo, la presenza di un velo di acqua liquida assicura la presenza di un'interfaccia sempre alla temperatura di 0°C, temperatura non sufficiente a determinare danni irreversibili nei tessuti.

4.4. Clima

L'uomo, durante gli innumerevoli spostamenti, si è venuto a trovare in luoghi con un carattere ambientale profondamente diverso da quelle di provenienza. Da quella che poteva essere una necessità di adattamento, fin dal '600 sono nati i primi studi analitici sul clima.

La climatologia studia le condizioni dell'ambiente atmosferico che caratterizzano una certa zona geografica in funzione degli organismi viventi. Essa è profondamente connessa ad altre scienze dell'uomo (sociologia) e della biologia, quali la geo-botanica, che si occupa delle relazioni tra piante spontanee e parametri climatici.

4.4.1. I fattori del clima. La parola clima viene dal greco *clinamen* che vuol dire 'inclinazione', concetto che implicitamente indica che il fattore climatico più importante è l'inclinazione dei raggi solari in una certa regione geografica, ovvero la latitudine.

In realtà i fattori che possono influire sul clima possono essere molteplici e distinguibili in **fattori cosmici, geo-topografici, biotici ed antropici**.

Ciascuno di questi fattori fa capo alle grandezze atmosferiche e meteorologiche viste in precedenza delle quali la climatologia osserva l'andamento spaziale e temporale da una prospettiva geografica.

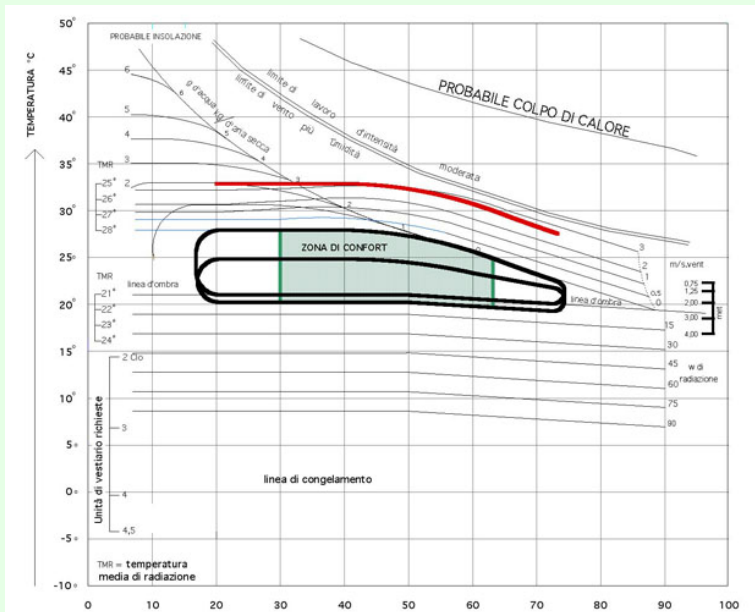
Nelle analisi climatiche è importante disporre di un gran numero di informazioni sia in termini temporali (storica) che spaziali, ed

essendo temperatura e piovosità le grandezze maggiormente osservate, gran parte delle descrizioni climatiche sono svolte su base termopluviometrica.

Dal punto di vista della elaborazione di questi dati, il clima rappresenta una sorta di 'media pluriennale' condizionata, filtrata e posta in relazione agli altri elementi, la cui influenza dipende in modo fondamentale dalla scala.

La climatologia si basa per questo sull'analisi delle grandezze meteorologiche di una determinata zona derivate da un minimo di 20 anni di osservazioni.

Il comfort - Il senso di benessere ambientale corrisponde per l'uomo ad un intervallo di temperature ed umidità a forma d'ala, evidenziato nel diagramma di Olgay [18].



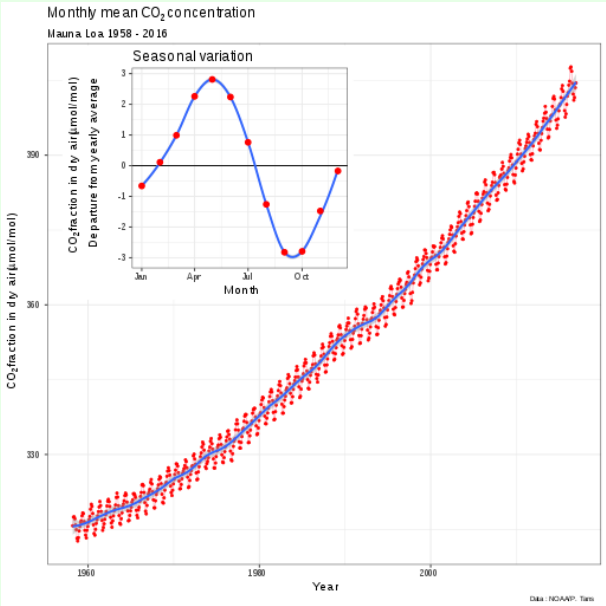
Nel diagramma si pone in evidenza come la zona di benessere slitti verso temperature più alte in presenza di vento e verso temperature più basse in presenza di radiazione, confermando come anche il comfort sia regolato dalle stesse 4 grandezze che determinano l'ET in Penman-Monteith.

4.4.2. Le scale del clima. Fondamentale quando si parla di clima è comprendere a che scala spaziale lo si sta intendendo allo scopo di utilizzare le informazioni necessarie a caratterizzarlo, come riportato nella tabella che segue

	scala	esempio
Microclima	1 cm : 10 m	contenitore per alimenti serra
Clima locale	10 m : 10 km	giardino
Mesoclima	1 km : 200 km	bacino
Macroclima	200 km : 10.000 km	regione

4.4.3. Le dinamiche climatiche. Le dinamiche climatiche si distinguono da quelle atmosferiche in quanto mirate a comprendere l'evoluzione delle medie pluriennali di variabili ed indicatori o analizzare gli stessi sulla grande scala al fine di comprendere l'evoluzione del clima in una determinata regione o sulla Terra.

La curva di Keeling - Quando si parla di cambiamento climatico, il trend forse più famoso è dato dalla curva data da una serie di misure della concentrazione di CO_2 registrate a Mauna Loa (Hawaii) dall'equipe del Dr. Keeling nel 1958 e rappresentata in figura (da [6]), in cui si osserva il passaggio da valori iniziali di 315ppm ai 400ppm del 2014.



Da quando si è iniziato a studiare il fenomeno, ci si è anche resi conto che un aumento della concentrazione di CO_2 corrispondeva anche ad un aumento della produttività vegetale: per questo nelle colture protette (serre) si è preso ad operare in ambienti arricchiti anche di diverse volte rispetto alla concentrazione atmosferica.

4.4.4. Parametri ed Indicatori climatici. Per definire le tipologie di clima ci si basa su variabili derivate. Tra esse non ci sono solo grandezze meteorologiche ma anche grandezze quali l'altitudine o la distanza del mare che si riferiscono alle prime in modo indiretto: sia la quota sul

livello del mare che la presenza di bacini d'acqua incidono in modo complesso sul clima fino ad alcune centinaia di *km*.

Gran parte di questi parametri derivano da osservazioni meteorologiche quali "Temperatura media pluriennale delle Temperature minime giornaliere di un certo mese" oppure il "numero medio dei giorni piovosi".

Le grandezze misurate possono essere usate per ottenere variabili derivate aventi la valenza di indicatori climatici, ovvero variabile indizzate a dare una valutazione di un certo obiettivo, quali fornire indicazioni sulla disponibilità di risorse (clima radiativo), determinare la (possibile) presenza di una certa tipologia vegetazionale o le condizioni per la coltivazione di piante di interesse agronomico, l'idoneità alla vita dell'uomo, piuttosto che le condizioni associate ad un deterioramento ambientale (erosione, desertificazione)

4.4.5. Classificazioni e Carte. In climatologia l'informazione è rappresentata attraverso l'uso di due strumenti fondamentali, la **classificazione** e **rappresentazione cartografica**.

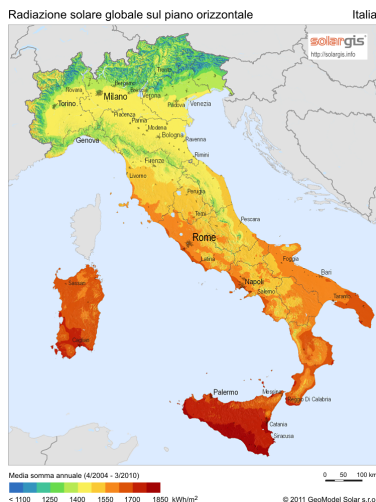
La classificazione presuppone l'individuazione di valori limite dell'indicatore a cui si verifica il mutamento di uno o più aspetti ritenuti fondamentali all'obiettivo preposto. Essa porta quindi ad una discretizzazione di significati associati ai valori assunti dall'indicatore.

La carta può invece essere una semplice rappresentazione, solitamente a falsi colori, del valore dell'indicatore, di cui ne riporta il valore dapprima **spazializzato** (es.Kriging) quindi **regionalizzato** attraverso l'uso di intervalli.

4.4.6. Climi parametrici. Con clima parametrico intendiamo una descrizione del clima attraverso le pure grandezze misurate. Le carte associate sono generate nell'ambito di programmi specifici, ma possono avere molteplici usi ed essere un punto di partenza per osservazioni a carattere descrittivo generali che possono essere il punto di partenza per ricavare informazioni derivate. Esempi ne sono l'eliofania ovvero il numero di ore di sole che in media si osservano nelle regioni Italiane, riportati nella tabella sottostante.

Regioni	intervalli di insolazione
Lombardia	5.0-5.4
Piemonte, Trentino, Friuli, Veneto, Emilia-Romagna, Marche, Umbria	5.5-5.9
Liguria, Toscana, Abruzzo, Molise, Campania e Basilicata	6.0-6.4
Lazio, Puglia, Calabria	6.5-6.9
Sicilia, Sardegna	7.0-7.4

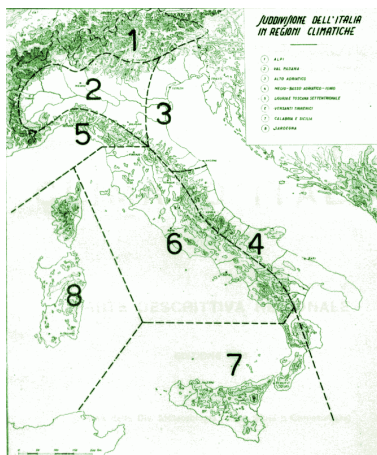
Un'esempio è dato dalla carta della radiazione solare annua, sviluppata per la progettazione di sistemi di produzione di energia alternativa ad energia solare, riportata in figura (da [8], valori espressi in Kwh/mq).



4.4.7. Climatologia meteo.

Anche se i modelli meteorologici stanno giorno dopo giorno incrementando il dettaglio territoriale delle previsioni, per alcune finalità è comoda una suddivisione del territorio in zone climatiche.

Nella figura a lato si riporta quella basata su 8 zone: 1. Alpi, 2. Valle padana, 3. Liguria e Toscana settentrionale, 4. versante tirrenico, 5. Adriatico settentrionale, 6. Adriatico centro-meridionale, 7. Calabria e Sicilia, 8. Sardegna.



4.4.8. Classificazioni Climatiche di uso generico. Come accennato sopra, la gran parte delle classificazioni climatiche si basano su indici ombro-termici, ovvero basato sull'andamento di piogge e temperature. In passato si è fatto per questo uso di indici basati anche su una sola delle due grandezze. Esempio ne è la classificazione di **De Cillis e Pantanelli** riportata in tabella.

denominazione	piovosità annua
desertico	< 250 mm
caldo-arido	<500
freddo-arido	<500 con aridità invernale
sub-umido	< 750
umido	> 750

La classificazione più famosa è senz'altro quella proposta nel 1918 da Wladimir **Köppen** per. Essa individua a scala globale cinque grandi gruppi indicate con le lettere maiuscole dalla A alla E sulla base delle T medie mensili (T_i), delle temperature medie pluriennali del mese più caldo (T_w) e di quello più freddo (T_c).

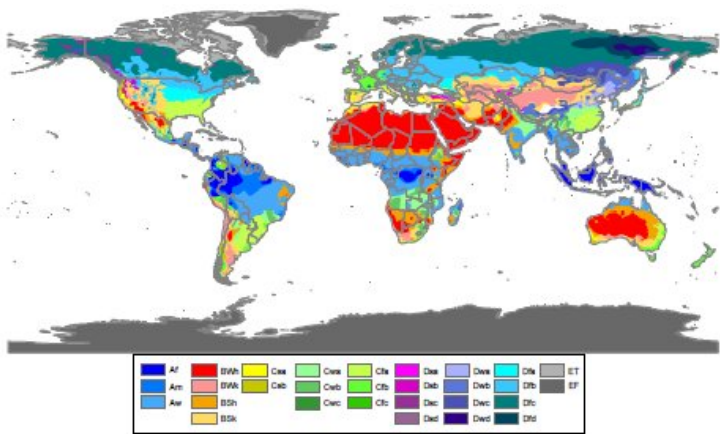
GRUPPO	significato
A	tropicale umido (megatermi) $T_i > 18^\circ\text{C}$
B	secco (arido e semiarido)
C	temperato medie lat. (mesotermi) $T_c > -3^\circ\text{C}$, $T_w > +10^\circ\text{C}$
D	continentale (microtermo) med.lat.
E	polare $T_w < +10^\circ\text{C}$

Il clima è dettagliato da 2 ulteriori lettere che definiscono i sotto-gruppi. La seconda lettera è stabilita a partire dal regime pluviometrico:

gruppo	2 ^a lettera	significato
A	<i>m</i>	area monsonica
A,C,D	<i>f</i>	senza stagione asciutta (foresta pluviale se A)
A,C,D	<i>w</i>	inverno asciutto (savana se A)
C,D	<i>s</i>	estate asciutta (mediterraneo)
B	<i>W</i>	desertico
B	<i>S</i>	steppa (con estate asciutta)
E	<i>F</i>	costantemente gelato
E	<i>T</i>	tundra

La terza lettera è stabilita a partire dall'andamento stagionale delle temperature:

gruppo	3 ^a lettera	
C,D	a - con estate molto calda (C e D)	\bar{T} del mese più caldo $T_w > 22^\circ\text{C}$
C,D	b - con estate calda (C e D)	\bar{T} del mese più caldo $T_w < 22^\circ\text{C}$
C,D	c - con estate fresca e breve (C e D)	meno di 4 mesi al di sopra di 10°C
C,D	d - Con inverno molto freddo; C (solo D)	\bar{T} del mese più freddo $T_c < -38^\circ$
B	h - Caldo-asciutto	\bar{T} annua $> 18^\circ\text{C}$
B	k - Freddo-asciutto	\bar{T} annua $< 18^\circ\text{C}$



Mappa climatica di Köppen (vedi figura, da [19])

4.4.9. Köppen-Pinna. Sebbene le tre lettere sono sufficienti a descrivere i macroclimi di una regione quale quella Europea, è spesso solo il punto di partenza per la definizione di classificazioni che richiedono ulteriori dettagli, quali la climatologia nazionale italiana, sviluppata da Pinna, e che fa uso della temperatura media annua (Tma), dell’escursione termica (Tes), della temperatura del mese più freddo (Tc) ed del numero di mesi con temperatura media maggiore di 20° (n20). La classificazione riportata in tabella (da [21]):

denominazione	Tma (°C)	Tes (°C)	Tc (°C)	n20
subcontinentale	10 : 14.4	≥ 19	−1 : 3.9	1 : 2
subcontinentale caldo	10 : 14.4	≥ 19	−1 : 3.9	3
subcontinentale di transizione	10 : 14.4	16 : 19	−1 : 3.9	1 : 2
sublitoraneo	10 : 14.4	16 : 19	4 : 5.9	3

Le stagioni - Nelle classificazioni climatiche raramente compare questo concetto a noi comune e, nel caso in cui avviene, può avere diversi significati. Inoltre, mentre l’uso dei termini specifici delle stagioni di transizione (primavera ed autunno) è più letterario, nell’area tropicale e subtropicale è in uso distinguere una stagione umida con piogge intense (monsoni) ed una stagione secca.

4.4.10. Indici ombrotermici. Come su detto temperatura e piovosità sono le grandezze maggiormente considerate dai climatologi ed è a partire da esse che viene calcolata la maggior parte degli indici climatici. Quelli di uso generico, alcuni dei quali sono esaminati qui di seguito,

fanno spesso riferimento ad un **rapporto** tra grandezze derivate dalle prime.

L'**indice di Lang** è forse il più semplice, infatti si basa sul rapporto fra il valore delle precipitazioni annue (P, mm) e quello della temperatura media annua ($T, ^\circ C$).

$$R = P/T$$

Sull'indicatore R (pluviofattore) è basata la classificazione riportata nella tabella seguente:

Clima	R
Umido	>160
Temperato umido	160-100
Temperato caldo	100-60
Semiarido	60-40
Steppico	<40

De Martonne nel 1923 sviluppò un indice di aridità I_a molto simile, in cui si evidenzia la temperatura critica di $10^\circ C$:

$$I_a = P/(T + 10)$$

Su di esso è basata la classificazione seguente:

Clima	I_a
Perumido	>60
Umido	60-30
Subumido	30-20
Semiarido (mediterraneo)	20-15
Arido	15-5
Arido estremo (desertico)	5-0

Emberger nel 1930 proponeva un quoziente pluviometrico Q che fa uso della T massima del mese più caldo ($M_w, ^\circ C$) e di quella minima del mese più freddo ($m_c, ^\circ C$):

$$Q = 100P/(M_w - m_c)$$

Su questo indice si basa la classificazione riportata in tabella:

Clima	Q
Umido	> 90
Subumido	90-50
Semiarido	50-30
Arido	<30

L'UNEP ha sviluppato in passato un Indice di Aridità che fa uso, in sostituzione della Temperatura, della ET_p :

$$I = \frac{P}{Etp}$$

Su di esso si basa la classificazione a 6 livelli seguente:

Clima	I
Umido	> 0.65
Subumido-secco	0.65:0.50
Semiarido	0.50:0.20
Arido	0.20:0.05
Iperarido	< 0.05

4.4.11. Indici Agro-Climatici. Le colture agrarie sono come visto in precedenza sensibili principalmente a due fattori: temperatura e disponibilità idrica, la cui combinazione è interpretata in climatologia da due concetti, aridità e siccità.

L'**aridità** è una **caratteristica di una zona** determinata dalla contemporanea scarsità di piogge (200-400 mm) e forte evaporazione. Circa il 47% della superficie del pianeta, ovvero 6 miliardi di ettari, è caratterizzato da terre aride o semi aride (UNEP 1997). Per caratterizzarle si fa allora uso di indici di aridità o xerotermici in quando sono definiti in base alla scarsità d'acqua (xēros = secco).

La **siccità**, invece è una condizione di bassa disponibilità idrica che si verifica **in un particolare periodo**; essa può caratterizzare una certa stagione come anche essere un fenomeno sporadico.

Anche in questi indici ci si basa su Temperatura e Piovosità per derivare gli indici, ma in questo caso basati sulla **differenza** tra i due termini, differenza in cui è facile riconoscere una stima del termine evapotraspirativo da cui deriva che l'indice è un surrogato del bilancio idrico. Eccone alcuni esempi.

Crowther - Si tratta di un indice che si basa su una differenza:

$$IC = P - 3.3 \cdot T$$

dove la temperatura T è data in $^{\circ}\text{C}$ e la precipitazione P è in cm.

Bagnouls e Gaussen - L'indicatore si basa su dati medi di temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e piovosità (mm) mensili:

$$BGI = \sum_i (2 \cdot T_i - P_i) \cdot K_i$$

(fattore K_i è funzione della frequenza con cui le differenze risultano positive). Su di esso si basa la classificazione a 6 livelli seguente:

Clima	BGI
Umido	< 50
	50:75
	75:100
	100:125
	125:150
Arido	> 150

Alla sua notevole semplicità interpretativa (l'acqua persa è calcolata come doppio della temperatura media) è dovuta la particolare diffusione del diagramma omonimo, utilizzato allo scopo di identificare il periodo di siccità. Si può osservare come nel diagramma della figura sotto riportata precipitazioni e temperature sono riportate su scale diverse in cui i valori delle temperature (in $^{\circ}\text{C}$) sono posti in corrispondenza di valori doppi delle piogge (in mm).

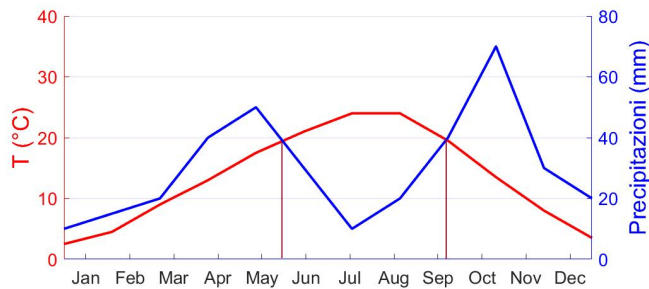


Diagramma di Bagnouls-Gaussen con indicata la zona di siccità

Thorntwaite - L'Indice Globale di Umidità Im si basa su un utilizzo esplicito dell' ET_p :

$$Im = \frac{P - ET_p}{Et_p} 100$$

dove P ed ET_p sono i valori annui (mm); su di esso si basa la classificazione seguente:

Clima	Im
Ipermido	> 100
Umido	100:20
Subumido-umido	20:50
Asciutto-subumido	0: -33
Semiarido	-33:-67
Arido	-67:-100

Tale indicatore oltre a prestarsi alla valenza di indice (è sempre compreso tra -100 e 100) esegue come in Bagouls-Gaussen una stima del bilancio idrico periodico attraverso il bilancio piogge-ET.

Indice di siccità - Si tratta di un indice in cui si considera direttamente la perdita d’acqua di una superficie (coltura) attraverso il confronto diretto della evapotraspirazione effettiva ET_{eff} e quella ottimale ET_{max} e tipicamente è calcolato per la stagione di accrescimento:

(4.4.1)

$$DT = \Sigma_i(ET_{max} - ET_{eff})$$

4.4.12. Classificazioni fito-climatiche. In questo genere di classificazioni, il clima è individuato dall’osservazione del bioma presente, e la denominazione può essere fatta a partire dalla specie più caratteristica dell’ associazione floristica (fitocenosi) presente, come nel caso della **zonazione fito-climatica del Pavari** (1888-1960) che fa uso di 3 parametri climatici:

- T : temperatura media annua [°C]
- Tf : temperatura media del mese più freddo [°C]
- Tm : temperatura media delle minime assolute annue [°C]

La classificazione è quella riportata in tabella

Zona	Sottozona	T	Tf	Tm
LAURETUM	Lc – warm	12 – 17	> 3	> - 9
	Lm – mean	14 – 18	> 5	> - 7
	Lf – cold	15 – 23	> 7	> - 4
CASTANETUM	Cc – warm	10 – 15	> - 1	> - 15
	Cf – cold	10 – 15	> 0	> - 12
FAGETUM	Fc – warm	6 – 12	> - 4	> - 25
	Ff – cold	7 – 12	> - 2	> - 20
PICETUM	Pc – warm	3 – 6	> - 3	> - 30
	Pf – cold	3 – 6	> - 3	> - 30
ALPINETUM	Cc – warm	2		> - 40

La fitogeografia - Il padre della fitogeografia può essere considerato Humboldt (1769 – 1859) il padre fondatore dell'Università nella sua accezione moderna (Humboldt University di Berlino). La disciplina, affine alla geobotanica, ha come obiettivo la descrizione e l'interpretazione delle distribuzioni delle popolazioni e dei taxa (dei vegetali) nello spazio e nel tempo.

4.5. Esercizi

Quesito - Quali processi della pianta dipendono dalla radiazione solare ?

Quesito - Cosa si intende per PAR ?

Quesito - Quale intervallo di frequenze della radiazione solare è utilizzato dalla fotosintesi?

Quesito - Cosa si intende per efficienza fotosintetica ?

Quesito - Qual'è la differenza tra pianta eliofila e sciafila ?

Quesito - Qual'è il significato della parola biomassa ?

Quesito - Cos'è il tasso di accrescimento ?

Quesito - Cosa si intende per tasso di accrescimento relativo ?

Quesito - Come si misura l'accrescimento di una coltura ?

Esercizio - Dati i valori di biomassa secca (ps) riportati in tabella, calcolare il tasso di crescita culturale e il tasso di crescita relativa nei due periodi identificati dai giorni dalla semina (gg). Ricalcolare le due colonne a destra

gg	ps (g/m^2)	CGR	RGR
100	200	-	-
120	300	$(300 - 200)/20 = 5$	$(\ln 300 - \ln 200)/20 = 0.02$
140	640	$(650 - 300)/20 = 17$	$(\ln 650 - \ln 300)/20 = 0.038$

Quesito - Cos'è l'indice di area fogliare ?

Quesito - Cosa sono gli stomi ?

Quesito - Come operano gli stomi ?

Quesito - Cosa si intende per evapotraspirazione ?

Quesito - Quali tipi di evapotraspirazione si usano distinguere?

Quesito - Quali criteri sono utilizzati per la programmazione irrigua aziendale ?

Quesito - Quali osservazioni sono utilizzate per individuare il momento dell'irrigazione ?

Quesito - Esprimere la espressione del bilancio idrico, indicando il significato dei simboli utilizzati

Quesito - Quali osservazioni sono utilizzate per individuare il momento dell'irrigazione ?

Quesito - Quali termini compaiono sia nel bilancio idrico che nel ciclo dell'acqua ?

Quesito - Quali metodi conosci per la stima dell'ET_o ?

Quesito - Quali variabili richiede il metodo di Thornthwaite ?

Quesito - Quali variabili richiede il metodo di Blaney-Criddle ?

Quesito - Quali variabili richiede il metodo di Penman ?

Quesito - Come reagisce una pianta allo stress idrico ?

Quesito - Quali condizioni ambientali conducono allo stress idrico ?

Quesito - Cos'è la fenologia ?

Quesito - Come reagisce una pianta alle temperature ?

Quesito - Cosa sono le temperature cardinali ?

Quesito - Cosa sono le temperature critiche ?

Quesito - Che differenza c'è tra piante macroterme e microterme ?

Quesito - Cosa si intende per somma termica ?

Quesito - Che effetto ha l'illuminazione sulla pianta ?

Quesito - Che differenza c'è tra una pianta brevidiurna ed una longidiurna ?

Esercizio - Quanti mm d'acqua può far evaporare in un giorno una radiazione con una intensità media su base giornaliera di 200 W/m^2 ?

Soluzione - Occorre in primo luogo effettuare un cambio di unità di misura:

$$I = 200 \text{ W/m}^2 = 200 \text{ J/s} \cdot 86400 \text{ s/d} \simeq 1.7 \cdot 10^7 \text{ J/m}^2 \text{d}$$

Quindi occorre ipotizzare di trasformare tutta l'energia disponibile in calore latente di evaporazione dell'acqua: dall'esercizio precedente $\lambda = 540 \text{ kcal/kg} = 2250 \text{ kJ/kg}$

Il tasso di massa d'acqua evaporata sarà quindi:

$$M_w = 1.7 \cdot 10^7 \text{ [J/m}^2 \text{d]} / 2.25 \cdot 10^6 \text{ [J/kg]} = 7.56 \text{ [kg/m}^2 \text{d]}$$

A questo punto non rimane che notare che per l'acqua:

$1 \text{ kg} = 1 \text{ L}$ e che $1 \text{ L/m}^2 = 1 \text{ mm}$, per cui si ottiene:

$$h_w = 7.56 \text{ [mm/d]}$$

Esercizio - supponiamo di avere un terreno con una densità apparente di 1.3 g/cm^3 , con umidità del 15% nei primi 20 cm e del 25% nel rimanente profilo, ed aventi $CIC = 30\%$ e $CA = 10\%$. Calcolare l'Acqua Disponibile Totale Effettiva e quella massima.

Soluzione

$$ADT = 1.3 \cdot (0.15 - 0.10) \cdot 200 + 1.3 \cdot (0.25 - 0.10) \cdot 800 = 169 \text{ mm};$$

$$ADT_{max} = 1.3 \cdot (0.3 - 0.10) \cdot 1000 = 260 \text{ mm}.$$

Esercizio - Calcolare la Riserva Utile (RU) per uno strato di suolo di 50 cm caratterizzato da $\theta_{CIC} = 30$, in cui è presente una coltura per cui $\theta_{PA} = 10$. Ricalcolare nello schema sottostante i valori di RU e contenuto idrico del terreno a partire dallo stato iniziale del terreno, $\theta = 20$ ed i valori dati di precipitazioni ed ET dati ad intervalli di 3gg.

data	$P(mm)$	$ET_c(mm)$	$RU(mm)$	$\theta\%$
1 giugno			$\frac{(20-10)}{100} \cdot 500 = 50$	20
4 giugno	-	15	$50 - 15 = 35$	$35/500 + 0.1 = 17$
7 giugno	5	8	$35 + 5 - 8 = 32$	$32/500 + 0.1 = 16$
10 giugno	-	12	$32 - 12 = 20$	$20/500 + 0.1 = 14$
13 giugno	-	15	$20 - 15 = 5$	$5/500 + 0.1 = 11$
16 giugno	22	10	$5 + 22 - 10 = 17$	$17/500 + 0.1 = 13$
19 giugno	-	12	$17 - 12 = 5$	$5/500 + 0.1 = 11$

Esercizio - Fino a che profondità viene bagnato in seguito ad una irrigazione di 40mm un terreno con $\rho_{aps} = 1.2g/cm^3$ e $U_{CIC} = 28$ connotato dai seguenti strati:

- (1) spessore 10cm, $U_1 = 15$
 - (2) spessore 15cm, $U_2 = 18$
 - (3) spessore 20cm, $U_3 = 22$
- Risposta - In primo luogo convertiamo tutti i valori in umidità volumica:

$\theta_{CIC} = 0.28 \cdot 1.2 = 0.336$
 $\theta_1 = 0.15 \cdot 1.2 = 0.180$
 $\theta_2 = 0.18 \cdot 1.2 = 0.216$
 $\theta_3 = 0.22 \cdot 1.2 = 0.264$ quindi otteniamo la quantità d'acqua necessaria a portare gli strati alla CIC in successione:

$h_1 = (0.336 - 0.180) \cdot 100mm = 15.6mm$
 $h_2 = (0.336 - 0.216) \cdot 150mm = 18.0mm$
 $h_3 = (0.336 - 0.264) \cdot 200mm = 14.4mm$
 Ne consegue che i 40mm apportati al terreno porteranno il primo strato alla CIC mentre 40-15.6=24.6mm finiranno al secondo strato, portando anche questo alla CIC e rilasciandone 24.6-18=6.6 al terzo che non sarà invece portato alla CIC ma all'umidità: $\theta_{3-end} = 0.264 + 6.6/200 = 0.297$

Quesito - Cosa si intende per somma termica ?

Esercizio - Data una coltivazione di FRUMENTO, con temperatura di soglia T_s pari a $0^\circ C$, data di semina 10 ottobre, data di raccolta 25 giugno, e sapendo che si tratta di un anno bisestile, ricalcolare, a partire dalle temperature medie mensili, la somma dei gradi giorno necessaria per il raggiungimento della fase FIORITURA (avvenuta il 20 maggio).

mese	T-media	SOMMA-mensile	TOTALE
ott	10.1	$10.1 \cdot 20 = 202$	202
nov	7.9	$7.9 \cdot 30 = 237$	439
dic	2.1	$2.1 \cdot 31 = 65.1$	504.1
gen	1.1	$1.1 \cdot 31 = 34.1$	538.2
feb	2.3	$2.3 \cdot 28 = 64.4$	602.6
mar	4.5	$4.5 \cdot 31 = 139.5$	742.1
apr	7.9	$7.9 \cdot 30 = 237$	979.1
mag	11.2	$11.2 \cdot 20 = 224$	1203.1

Quesito - Cos'è il coefficiente colturale ?

Esercizio - A partire dai dati della tabella calcolare il K_c della coltura a 40 e 80 giorni dalla semina. (Si raccomanda di fare il grafico dell'andamento del K_c)

fase	semina	levata	fioritura	maturazione	finale
durata	30	30	40	20	
K_c	0.3	0.3	1.05	1.05	0.8

Soluzione - I valori si ottengono per interpolazione; il primo corrisponde a 10gg dopo l'inizio levata, per cui: $K_c(40) = 0.3 + (1.05 - 0.30)/30 \cdot 10 = 0.55$ Il secondo caso si riferisce invece a 20gg dopo la fioritura quindi nella zona in cui il valore del K_c è costante per cui: $K_c(80) = 1.05$.

Quesito - Cosa si intende con la parola clima ?

Quesito - Cosa serve per studiare il clima di un'area ?

Quesito - Quali sono le scale di osservazione per la definizione del clima ?

Quesito - Cosa si intende per dinamica climatica ?

Quesito - Cosa si intende per parametri climatici ? fare qualche esempio.

Quesito - Cosa si intende per indicatori climatici ? fare qualche esempio.

Quesito - Fare un esempio di grandezze climatiche derivate da osservazioni meteorologiche.

Quesito - Come si passa da un indicatore ad un indice quindi ad una classificazione ?

Quesito - Cos'è un indice ombrotermico ?

Quesito - Su quali osservazioni si basa la classificazione di Koppen ?

Quesito - Quali grandezze utilizza la classificazione per l'Italia di Pinna ?

Quesito - Sapresti indicare almeno un indice basato sul rapporto temperatura/piogge ?

Quesito - A cosa si riferiscono i termini aridità e siccità ?

Quesito - Sapresti indicare almeno un indice basato sulla differenza tra temperatura e piogge ?

Quesito - Cos'è l'indice di Bagnouls-Gaussen ?

Quesito - Da cosa è caratterizzato il grafico di Bagnouls-Gaussen ?

Esercizio - Costruire e discutere il diagramma di Bagnouls-Gaussen a partire dati riportati nella tabella seguente,

mese	T-media (°C)	Prec (mm)	mese	T-media (°C)	Prec (mm)
gen	2	30	lug	23	20
feb	4	45	ago	24	30
mar	8	60	set	19	60
apr	12	75	ott	15	75
mag	17	65	nov	10	90
giu	21	40	dic	4	60

Quesito - Conosci indici basati sul calcolo della differenza tra piogge ed ET ?

Quesito - Cosa si intende per fitoclima ?

Bibliografia

- [1] ACDX, *CIE_1934*, CC BY-SA 4.0-3.0-2.5-2.0-1.0, via Wikimedia Commons, 2009.
- [2] AJC1, *Stomata*, CC BY-SA 2.0, by Flickr, 2016.
- [3] E. BERNACCA, *Che tempo farà*, Mondadori, 1971.
- [4] CIE, *Commission internationale de l'Eclairage proceedings*, Cambridge University Press., Cambridge, 1931.
- [5] V. DE BRUYN AND COTON, *No Title*, CC BY-SA 3.0 or GFDL, via Wikimedia Commons, 2015.
- [6] DELORME, *CO2 at MaunaLoa*, CC BY-SA 4.0, via Wikimedia Commons, 2017.
- [7] J. DOOREMBOS AND W. PRUITT, *Guidelines for Predicting Crop Water Requirements*, FAO, 1977.
- [8] GEOMODELSOLAR, *Solar Map*, CC BY-SA 3.0, via Wikimedia Commons, 2011.
- [9] T. GOLDSMITH, *Come vedono gli uccelli*, Le Scienze, (2006), pp. 76–83.
- [10] JAN-JOOST VERHOEF, *lightning*, CC BY 2.0, 2009.
- [11] JAN-JOOST VERHOEF AND ACDX, *CIE_1934*, 2009.
- [12] KIRK39, *Solar spectrum at ground*, CC BY-SA 4.0, via Wikimedia Commons, 2016.
- [13] V. KRATOCHVIL, *Hoar frost*, public domain, by www.publicdomainpicture.net, 2016.
- [14] K. G. LIBBRECHT, *Snowcrystals*, 2016.
- [15] U. MEIER, *Growth stages of mono-and dicotyledonous plants*, Federal Biological Research Centre for Agriculture and Forestry, 2001.
- [16] NASA, *Ozone hole*, Public domain, via Wikimedia Commons, 2006.
- [17] NMOAS, *Hair hygrometer*, public domain, by wikipedia, 2010.
- [18] V. OLGAY, *Design with Climate*, Princeton, 2015.
- [19] M. C. PEEL, B. L. FINLAYSON, T. A. MCMAHON, AND A. ZIFAN, *No Title*, CC BY-SA 4.0, via Wikimedia Commons, 2016.
- [20] PIERRE_CB, *Dday weather*, Public domain, via Wikimedia Commons, 2015.
- [21] M. PINNA, *L'atmosfera e il clima*, UTET, Torino, 1978.
- [22] SCH, *EffectiveTemperature*, GFDL or CC-BY-SA-3.0, via Wikimedia Commons, 2006.
- [23] M. R. VILLARREAL, *Mosquito*, Public domain, via Wikimedia Commons, 2010.
- [24] M. VINATTIERI, *Cloudiness map*, CC BY-SA 3.0, via Wikimedia Commons, 2011.
- [25] J. WHITMARSH AND GOVINDJEE, *PAR action spectrum*, CC BY-SA 2.0, via Wikimedia Commons, 2009.
- [26] D. ZARAS, *Tornado*, Public domain, via Wikimedia Commons, 2007.